

Modell Deutschland

Circular Economy

Machbarkeitsstudie im Auftrag des WWF Deutschland

Freiburg, 15.07.2022

Autorinnen und Autoren

Öko-Institut e.V.

Siddharth Prakash
Carl-Otto Gensch
Günter Dehoust
Dr. Florian Antony
Kevin Stuber-Rousselle
Clara Löw
Dr. Johannes Betz

Fraunhofer ISI

Dr. Andrea Herbst
Dr. Antonia Loibl
Dr. Matthias Pfaff

Freie Universität Berlin

Dr. Klaus Jacob
Valentin Fiala

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Siddharth Prakash

Head of Sub-Division „Circular Economy and Global Value Chains“,
Division Sustainable Products and Material Flows
Oeko-Institut e.V.
P.O. Box 17 71
79017 Freiburg, Germany
Tel: +49-761-45 295 244
Mobile: +49-160 907 970 35
E-Mail: s.prakash@oeko.de

Rebecca Tauer

Programmleitung Circular Economy
WWF Deutschland
Reinhardstr. 18, 10117 Berlin
Tel: +49 30 311777-747
Mobil: +49 151 18854991
E-Mail: rebecca.tauer@wwf.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung	10
Summary	12
1 Hintergrund und Zielsetzung	14
2 Methodisches Vorgehen	16
2.1 Definition einer übergeordneten Vision sowie einer Arbeitsdefinition für die Circular Economy	16
2.2 Scoping – Auswahl und Priorisierung von Sektoren, Produkten und Materialien für die Modellierung der Circular Economy	16
2.2.1 Sektorperspektive	17
2.2.2 Produktperspektive	19
2.2.3 Materialperspektive	20
2.3 Identifizierung und Bewertung von sektorspezifischen Circular Economy-Maßnahmen	21
2.4 Einordnung der existierenden Modelle zur Bewertung der qualitativen und quantitativen Folgenabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen	22
3 Ergebnisse	24
3.1 Definition und Vision einer Circular Economy	24
3.2 Circular Economy: Relevante Sektoren, Produkte und Materialien	26
3.2.1 Sektorperspektive	26
3.2.2 Produktperspektive	34
3.2.3 Materialperspektive	35
3.2.4 Baukasten für die Modellierung – Sektoren, Produkte, Materialien	41
3.3 Definition von ökologischen und ökonomischen Kenngrößen für die Modellierung	43
3.3.1 Ökologische Kenngrößen	43
3.3.2 Sozio-ökonomische Kenngrößen	48
3.4 Wichtigste sektorspezifische Circular Economy-Maßnahmen	49
3.4.1 Verpackungen	50
3.4.2 Batterien	53
3.4.3 IKT	56

3.4.4	Haushaltsgeräte	58
3.4.5	Fahrzeuge	61
3.4.6	Hochbau	63
3.4.7	Tiefbau	66
3.4.8	Lebensmittel	69
3.4.9	Textilien	71
3.4.10	Möbel	73
3.4.11	Beleuchtung	75
3.5	Existierende Modelle zur Bewertung der qualitativen und quantitativen Folgenabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen	78
3.5.1	Umweltbundesamt: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE	78
3.5.2	International Resource Panel (IRP): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, ODYM-RECC	80
3.5.3	Umweltbundesamt: Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)	82
3.5.4	Fazit	83
3.6	Vorschlag eines Circular Economy-Bewertungsmodells für die Hauptstudie, inkl. Szenarienbildung	84
3.6.1	Vorschlag eines Bewertungsmodells	84
3.6.2	Vorgehen des Bewertungsmodells	93
3.6.3	Beispielhafte Illustration	98
3.7	Erstellung und Berechnung einer Politik-Roadmap für eine Circular Economy in Deutschland	104
3.7.1	Beschreibung des Ausgangspunktes und eines Zielsystems	105
3.7.2	Erarbeitung von politischen Instrumenten und Zusammenfassung in Maßnahmenbündel	106
3.7.3	Bewertung (Kosten-Nutzen-Analyse) und Verifizierung mit dem strategischen Beirat sowie Stakeholdern	107
3.7.4	Erarbeitung der Roadmap und Unterstützung ihrer Kommunikation	108
4	Diskussion und Ausblick für die Modellierung von Circular Economy	110
	Literaturverzeichnis	112
	Anhang I. Literatur zur Bewertung der Produktperspektive	116
	Anhang II. Literatur zur Bewertung der Materialperspektive	118
	Anhang III. Literatur zur Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen (Kapitel 3.4)	120
	Anhang IV. Liste der in EXIOBASE erfassten Umweltkategorien	129

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept des Vorhabens „Modell Deutschland Circular Economy“ vom WWF Deutschland	15
Abbildung 2: Auswahl von Sektoren, Produkten und Materialien	17
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines EE-MRIO-Modells, zusammengefasst für Deutschland und den Rest der Welt (RoW)	18
Abbildung 4: Orientierung für die Definition von Circular Economy-Maßnahmen	21
Abbildung 5: Systematik und Bewertungsschema für die Circular Economy-Maßnahmen	22
Abbildung 6: Definition, Vision und Handlungsstrategien einer Circular Economy	25
Abbildung 7: Sektorale Umweltwirkungen als Anteile der jeweiligen Gesamtmengen für Deutschland - Konsumperspektive	26
Abbildung 8: Sektorale Umweltwirkungen als Anteile der jeweiligen Gesamtmengen für Deutschland - Produktionsperspektive	27
Abbildung 9: Grobeinteilung von Verpackungstypen	30
Abbildung 10: Vorschlag von Sektoren für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen	33
Abbildung 11: Gruppierung von Materialien/Rohstoffen nach Umweltgefährdungspotenzial und Kritikalität	39
Abbildung 12: Materialgruppen und Beispielmateriale und deren Verwendung in Nachfragesektoren und Bedürfnisfeldern, rote Pfeile zeigen die Verwendung der Beispielmateriale in roter Schrift	40
Abbildung 13: Darstellung zum Vorgehen bei der Abschätzung von Biodiversitätseffekten	46
Abbildung 14: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Verpackungen	52
Abbildung 15: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Batterien	55
Abbildung 16: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei IKT	57
Abbildung 17: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Haushaltsgeräten	60
Abbildung 18: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Fahrzeugen	62
Abbildung 19: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen im Hochbau	65
Abbildung 20: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen in Tiefbau	68
Abbildung 21: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Lebensmitteln	70
Abbildung 22: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Textilien	72
Abbildung 23: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Möbeln	74
Abbildung 24: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Beleuchtung	77

Abbildung 25: Modellfamilie der RESCUE-Studie	78
Abbildung 26: Rohstoffindikatoren und damit verbundene Stoffströme in der RESCUE-Studie	79
Abbildung 27: Im Modell ODYM-RECC betrachtete Strategien zur Steigerung der Materialeffizienz und Modellannahmen	81
Abbildung 28: Schematische Darstellung von Modelltypen und deren Charakteristika als hybrides System	84
Abbildung 29: Schematische Darstellung des Bewertungsmodells	85
Abbildung 30: Schematische Darstellung Ökobilanzierung (LCA)	86
Abbildung 31: Schematische Darstellung Materialflussmodellierung (MFA)	87
Abbildung 32: Übersicht Modell FORECAST Industry	88
Abbildung 33: Umsetzung von Circular Economy-Impulsen in EE-MRIO	90
Abbildung 34: Darstellung der direkten, indirekten und induzierten Effekte in ISI-Macro	91
Abbildung 35: Berechnungslogik des Biodiversitätsverlusts mithilfe von EXIOBASE	92
Abbildung 36: Vorgehen des Bewertungsmodells	93
Abbildung 37: Sektorale Fokus des Bewertungsmodells	96
Abbildung 38: Beispiel Fact-Sheet S2 "Bewertung und Aufbereitung von Circular Economy-Maßnahmen für die Modellierung"	100
Abbildung 39: Vereinfachte schematische Darstellung der Verortung der Maßnahme im Bewertungsmodell	101
Abbildung 40: Vereinfachte Darstellung der Wertschöpfungskette Zement	101
Abbildung 41: Quantifizierung des Maßnahmen-Impact im Rahmen der Materialflussanalyse	102
Abbildung 42: Schematische Darstellung der Szenario- und Wirkungsanalyse	103
Abbildung 43: Charakterisierung der Politikinstrumente und Narrative in der Roadmap	104
Abbildung 44: Darstellung des Arbeitsablaufs für die Erstellung der Politik-Roadmap	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich der in dieser Studie identifizierten Sektoren mit dem EU Circular Economy Action Plan und der Studie "Strukturwandel zu einer Green Economy"	29
Tabelle 2:	Auswahl der zu betrachtenden Sektoren	30
Tabelle 3:	Übersicht der für die nächsten Jahre und Jahrzehnte erwarteten technologischen Entwicklungen und Trends für verschiedene Sektoren.	31
Tabelle 4:	Umweltrelevante Produkte, Anwendungen und Dienstleistungen	34
Tabelle 5:	Wirtschaftlich bedeutende Rohstoffe (einschließlich Massenrohstoffe) mit hohem Versorgungsrisiko und Umweltgefährdungspotential, sortiert nach abnehmender wirtschaftlicher Bedeutung	37
Tabelle 6:	Baukasten für die Modellierung – Sektoren, Produkte, Materialien	41
Tabelle 7:	Definition von zu betrachtenden ökologischen Kenngrößen	43
Tabelle 8:	Betrachtete Treibhausgase und entsprechende GWP ₁₀₀ -Faktoren	44
Tabelle 9:	Definition von zu betrachtenden sozi-ökonomischen Kenngrößen	48
Tabelle 10:	Verpackungen: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	50
Tabelle 11:	Batterien: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	54
Tabelle 12:	IKT: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	56
Tabelle 13:	Haushaltsgeräte: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	59
Tabelle 14:	Fahrzeuge: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	61
Tabelle 15:	Hochbau: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	64
Tabelle 16:	Tiefbau: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	66
Tabelle 17:	Lebensmittel: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	69
Tabelle 18:	Textilien: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	71
Tabelle 19:	Möbel: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	73
Tabelle 20:	Beleuchtung: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen	76
Tabelle 21:	Umweltwirkungskategorien der BR Toolbox #64 der Europäischen Kommission und Korrespondenz mit Indikatoren in EXIOBASE; GWP100 basiert auf IPCC AR 6	129

Abkürzungsverzeichnis

/a	pro Jahr
°C	Grad Celsius
ALMOD	Agriculture and Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) Model
BAU	business as usual
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BIP	Bruttoinlandsprodukt
Bsp.	Beispiel
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CBD	Convention on Biological Diversity
CCS	Carbon Capture Storage
CCU	Carbon Capture Usage
CE	Circular Economy
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
CSA	Kalziumsulfoaluminat
d.h.	das heißt
DAC	Direct Air Capture
DERec	Direct Effect of Recovery
DIERec	Direct and Indirect Effects of Recovery
DMI	Direkter Materialeinsatz
EE	Umwelterweiterungen (engl. environmental extensions)
EI	Economic Importance
GEMOD	Gebäude-Modell
GWP	Treibhauspotenzial (engl. global warming potential)
HFCs	Fluorkohlenwasserstoffe (Hydrofluorocarbons)
i. d. R.	in der Regel
inkl.	inklusive
IRP	International Resource Panel

KEA	Kumulierter Energieaufwand
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LED	Light-Emitting Diode
Lkw	Lastkraftwagen
MFA	Materialflussanalyse
MRIO	Multiregionaler Input-Output
MSA	Mean Species Abundance
N ₂ O	Lachgas
O ₃	Ozon
PFCs	Per- und polyfluorierte Chemikalien
PGM	Platingruppenmetalle
Pkw	Personenkraftwagen
RMC	Raw Material Consumption
RMI	Raw Material Input
s.	siehe
SCOPE	Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SR	Supply Risk
SUV	Sport Utility Vehicle
t	Tonnen
THG	Treibhausgas
TMR	Total Material Requirement
TREMOT	Transport Emission Model
URMOD	Umweltökonomisches Rohstoff- und Treibhausgas-Modell
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Die Bundesregierung hat es sich in ihrer Koalitionsvereinbarung zum Ziel gesetzt, eine neue, integrierte Kreislaufwirtschaftsstrategie zu entwickeln. Eine ganzheitliche ökologische und ökonomische Folgeabschätzung einer Circular Economy existiert für Deutschland allerdings noch nicht. Es bedarf einer fundierten wissenschaftlichen Analyse, die Handlungsansätze in allen relevanten Schlüssel-sektoren entwickelt und bewertet, dabei ein breites Spektrum von Zieldimensionen betrachtet und Zielkonflikte sowie Wechselwirkungen im Auge behält, um ganzheitlich sinnvolle Pfade zur Zielerreichung aufzuzeigen.

Das Ziel der hier vorliegenden Studie ist, die methodischen und fachlichen Grundlagen für die **ökologische und ökonomische Folgeabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen in relevanten Schlüsselsektoren** zu prüfen. Darauf aufbauend sollen Empfehlungen für die Umsetzung eines **Circular Economy-Bewertungsmodells für Deutschland** abgeleitet werden. Das Bewertungsmodell soll zur Entwicklung einer **Politik-Roadmap für eine Circular Economy in Deutschland** beitragen und somit Einfluss auf die vorgesehene nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie nehmen.

Die hier vorliegende Studie schlägt ein sektorübergreifendes, **hybrides Bewertungsmodell** zur qualitativen und quantitativen Folgeabschätzung einer umfassenden Circular Economy in Deutschland vor. Im vorgeschlagenen Bewertungsmodell kommen eine Reihe der wichtigsten Methoden und Modelle zum Einsatz, die derzeit angewendet werden. Hierzu gehören:

- Ökobilanzierung zur Abbildung der **Produktperspektive**,
- Materialflussanalyse und Bottom-up-Simulation zur Abbildung der **Material-/Grundstoffperspektive**
- sowie die makroökonomische Modellierung zur Berücksichtigung der **gesamtwirtschaftlichen Perspektive** (z. B. Environmentally Extended Multiregional Input-Output-Analyse, makroökonomische Modellierung).

Im Bewertungsmodell werden die einzelnen Modelle schwerpunktmäßig für die Fragestellungen eingesetzt, die ihren jeweiligen Stärken entsprechen. Durch die Implementierung von Schnittstellen wird ein hybrides Modellsystem geschaffen, welches dazu beiträgt, die Stärken der Modelle zu fördern und deren Schwächen zu überwinden. Das bedeutet, dass es einerseits möglich ist, den systemisch gesamtwirtschaftlichen Kontext der Circular Economy zu verstehen, und andererseits Wirkungen einzelner/alternativer Circular Economy- und Technologieoptionen mit hohem Detaillierungsgrad zu untersuchen. Zusätzlich dazu werden, basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Machbarkeitsstudie, entsprechende Modellerweiterungen vorgenommen bzw. ergänzende Analysen durchgeführt, um die Wirkung von Circular Economy-Maßnahmen entlang der definierten Zielkategorien **Klimaschutzziele, Biodiversitäts- und Ressourcenschutz und sozioökonomische Wirkungen** zu beleuchten.

In der Studie wurden elf relevante Sektoren für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen identifiziert:

- | | |
|--|------------------|
| 1. Verpackungen, | 7. Tiefbau, |
| 2. Batterien, | 8. Lebensmittel, |
| 3. Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), | 9. Textilien, |
| 4. Haushaltsgeräte, | 10. Möbel, und |
| 5. Fahrzeuge, | 11. Beleuchtung. |
| 6. Hochbau, | |

Für jeden Sektor wurden Circular Economy-Maßnahmen, die sich an den Zielen der fünfstufigen Abfallhierarchie sowie 10-R-Strategien orientieren, definiert. Ziel war dabei, die obersten Stufen zur Abfallvermeidung (Vermeidung, Wiederverwendung, Reparaturen, Substitution) prioritär gegenüber den unteren (Recycling, energetische Verwertung, Beseitigung) zu behandeln. Insgesamt wurden **107 Circular Economy-Maßnahmen in elf Sektoren** definiert.

Zur Einschätzung des Aufwandes und der Komplexität für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen wurde jede einzelne Maßnahme einer qualitativen Bewertung unterzogen. Dabei wurden folgende Kriterien für die Bewertung zugrunde gelegt:

- | | |
|--|---|
| 1. Umweltentlastungspotenzial, | 5. Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen, |
| 2. Auswirkungen auf Unternehmen, | 6. Datenverfügbarkeit, |
| 3. Auswirkungen auf Verbraucher*innen, | 7. Technologische Reife, |
| 4. Zielkonflikte, | 8. Marktstrukturelle Voraussetzungen. |

Ein zusätzliches Ziel der Bewertung der Maßnahmen anhand oben genannter Kriterien war, die Machbarkeit einzelner Maßnahmen vor dem Hintergrund realistischer Technikoptionen, sozialer Innovationen und marktstruktureller sowie gesellschaftlicher Akzeptanz zu prüfen.

Neben dem Aspekt des **Klimawandels** hat die Studie einen methodischen Vorschlag zur Modellierung und Quantifizierung von **Biodiversitätseffekten** gemacht. Darüber hinaus wurden verschiedene Indikatoren zur Modellierung der **Ressourceninanspruchnahme** geprüft und ein Vorschlag für die potenzielle Indikatorik und deren Ergänzung abgeleitet. Zusätzlich wurden sozio-ökonomische Indikatoren wie Beschäftigung, Bruttowertschöpfung und Versorgungssicherheit mit Rohstoffen für die Modellierung geprüft und vorgeschlagen.

Mithilfe des im Rahmen der Machbarkeitsstudie empfohlenen hybriden Ansatzes können die wichtigsten ökologischen und sozio-ökonomischen Einzeleffekte der jeweiligen Maßnahmen präzise und Wechselwirkungen innerhalb einzelner Zieldimensionen zu einem großen Teil abgebildet werden. Allerdings müssen für diverse Bereiche plausible Annahmen getroffen werden, um die ökologischen und ökonomischen Folgeabschätzungen einer Circular Economy zu modellieren. Dies gilt beispielsweise für die Validierung der Definition der Maßnahmen, Methodenwahl, Bestimmung der Inputparameter zu Referenzprodukten und Alternativen sowie die Auswahl relevanter Umfeldentwicklungen.

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass die Umsetzung der Modellierung nicht nur weitere Expert*innen und Stakeholder bei der Festlegung von Annahmen und Modellierungsparametern einbezieht, sondern auch möglichst hohe Transparenz bei der Dokumentation der Annahmen und verwendeten Daten gewährleistet. Ferner kann mit Sensitivitätsanalysen untersucht werden, inwiefern Abschätzungen und Annahmen die Ergebnisse der ermittelten Folgen beeinflussen. Insgesamt besteht Konsens darüber, dass es unrealistisch ist, die Komplexität einer ganzheitlichen Circular Economy in Deutschland in einem Modell vollumfänglich abzubilden. Wichtig ist die Nachvollziehbarkeit der Modellierungsparameter und der unterstellten Wirkungszusammenhänge, vor allem wenn sie die Grundlage für die Entwicklung einer Politik-Roadmap liefern sollen.

Zusammenfassend kann auf der Grundlage der Ergebnisse der vorliegenden Machbarkeitsstudie der Schluss gezogen werden, dass das Modell Deutschland Circular Economy grundsätzlich im Sinne der vom WWF verfolgten Zielsetzung umsetzbar, wenngleich anspruchsvoll ist und einiger Voraussetzungen bedarf. Es konnte gezeigt werden, dass die Verbindung der Sektor-, der Produkt- und der Materialperspektive zwar komplex, aber anhand des hybriden Modellansatzes machbar ist. Daneben wurden aus elf Sektoren Maßnahmen zusammengetragen, die dazu geeignet sind, die Circular Economy in Deutschland effektiv zu fördern, und deren Auswirkungen durch Bündelung einzelner Maßnahmen zu konsistenten und kohärenten Szenarien in ihren ökologischen und ökonomischen Auswirkungen quantitativ abzubilden. Zu den hier relevanten Kenngrößen wurde in dieser Vorstudie ein Vorschlag erarbeitet.

Summary

In its coalition agreement, the German government has set itself the goal of developing a new, integrated Circular Economy strategy. However, a holistic ecological and economic impact assessment of a Circular Economy does not yet exist for Germany. A well-founded scientific analysis is needed that develops and evaluates approaches to action in all relevant key sectors, considers a broad spectrum of target dimensions and keeps an eye on conflicting targets and interactions in order to identify holistically sensible pathways to achieving the sustainability targets.

The aim of this study is to **examine the methodological and technical basis for the ecological and economic impact assessment of Circular Economy measures in key sectors**. Based on this, recommendations for the implementation of a **Circular Economy assessment model for Germany** will be derived. The assessment model should contribute to the development of a **policy roadmap for a Circular Economy in Germany** and thus influence the planned national Circular Economy strategy.

This study proposes a cross-sectoral, **hybrid assessment model** for the qualitative and quantitative impact assessment of a comprehensive Circular Economy in Germany. The proposed assessment model uses a combination of a number of methods and models currently applied. These include:

- Life cycle assessment to map the **product perspective**,
- material flow analysis and bottom-up simulation to represent the **material/primary industry perspective** and
- macroeconomic modelling to take into account the **overall economic perspective** (e.g. environmentally extended multiregional input-output analysis, macroeconomic modelling).

In the assessment model, the individual models are used primarily for the questions that correspond to their respective strengths. By implementing interfaces, a hybrid model system is created, which helps to promote the strengths of the models and to overcome their weaknesses. This means that, on the one hand, it is possible to understand the systemic macroeconomic context of the Circular Economy and, on the other hand, to investigate the effects of individual/alternative Circular Economy and technology options with a high level of detail. In addition, based on the results of the present feasibility study, corresponding model extensions and supplementary analyses are carried out in order to illuminate the effects of Circular Economy measures along the defined target categories of **climate protection goals, biodiversity and resource protection and socio-economic effects**.

The study identified eleven relevant sectors for the modelling of Circular Economy measures:

- | | |
|--|---------------------------|
| 1. packaging, | 6. building construction, |
| 2. batteries, | 7. civil engineering, |
| 3. information and communication technologies (ICT), | 8. food, |
| 4. household appliances, | 9. textiles, |
| 5. vehicles, | 10. furniture, and |
| | 11. lighting. |

For each sector, Circular Economy measures were defined based on the goals of the five-stage waste hierarchy and 10-R strategies. The aim was to prioritise the highest levels of waste prevention (avoidance, reuse, repair, substitution) over the lower levels (recycling, energy recovery, disposal). A total of **107 Circular Economy measures were defined in eleven sectors**.

In order to assess the effort and complexity for modelling Circular Economy measures, each individual measure was subjected to a qualitative assessment. The following criteria were used for the evaluation:

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Environmental relief potential, | 5. interactions between measures, |
| 2. impact on companies, | 6. data availability, |
| 3. effects on consumers, | 7. technological maturity, |
| 4. conflicts of objectives, | 8. market structural conditions. |

An additional objective of the evaluation of the measures on the basis of the above criteria was to examine the feasibility of individual measures against the background of realistic technology options, social innovations and existing market structures as well as social acceptance.

In addition to the aspect of **climate change**, the study made a methodological proposal for modelling and quantifying **biodiversity effects**. Furthermore, various indicators for modelling **resource use** were examined and a proposal for potential indicators and their supplementation was derived. In addition, socio-economic indicators such as employment, gross value added, and security of raw material supply were examined and proposed for modelling.

With the help of the hybrid approach recommended in the feasibility study, the most important individual ecological and socio-economic effects of the respective measures can be mapped precisely and interactions within individual target dimensions can be evaluated to a large extent. However, plausible assumptions must be made for various areas in order to model the ecological and economic impact assessments of a circular economy. This applies, for example, to the validation of the definition of measures, the choice of methods, the determination of input parameters for reference products and alternatives, and the selection of relevant environmental developments.

Against this background, it is important that the implementation of the modelling not only involves further experts and stakeholders in the determination of assumptions and modelling parameters, but also ensures the highest possible transparency in the documentation of the assumptions and data used. Furthermore, sensitivity analyses can be used to examine the extent to which estimates, and assumptions influence the results of the identified impacts. Overall, there is a consensus that it is unrealistic to fully represent the complexity of a holistic Circular Economy in Germany in one model. It is important that the modelling parameters and the assumed cause-effect relationships are comprehensible, especially if they are to provide the basis for the development of a policy roadmap.

In summary, based on the results of the present feasibility study, it can be concluded that a Circular Economy model assessment for Germany can in principle be implemented in the sense of the objective pursued by the WWF, although it is demanding and requires some preconditions. It was shown that the combination of the sector, product and material perspectives is complex, but feasible using the hybrid model approach. In addition, measures were collected from eleven sectors that are suitable for effectively promoting the Circular Economy in Germany, and it is possible to evaluate ecological and economic impacts quantitatively by bundling individual measures into consistent and coherent scenarios. A proposal for the relevant parameters was developed in this preliminary study.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Der Ressourcenrat der Vereinten Nationen schätzt, dass die Extraktion und Weiterverarbeitung von Rohstoffen (Biomasse, Metalle, nicht-metallische Mineralien und fossile Energieträger) zu ca. 50 % der globalen Treibhausgasemissionen und mehr als 90 % der Biodiversitätsverluste und des Wasserstresses beitragen (International Resource Panel 2019). In Deutschland bewegt sich der Rohstoffkonsum mit ca. 16 t pro Kopf und Jahr auf einem sehr hohen Niveau. Er liegt 10 % über dem europäischen Durchschnitt (Umweltbundesamt 29.11.2018) und ist mindestens doppelt so hoch wie in Entwicklungs- und Schwellenländern (Umweltbundesamt 2016). Ein Blick auf die statistischen Daten zeigt, dass die Verwendung von Rohstoffen für die Wirtschaft und den Konsum trotz vieler Anstrengungen und Politikmaßnahmen auch in Deutschland bestenfalls stagniert und die Abfallmengen nach wie vor auf einem sehr hohen Niveau liegen (BMUV 2020).

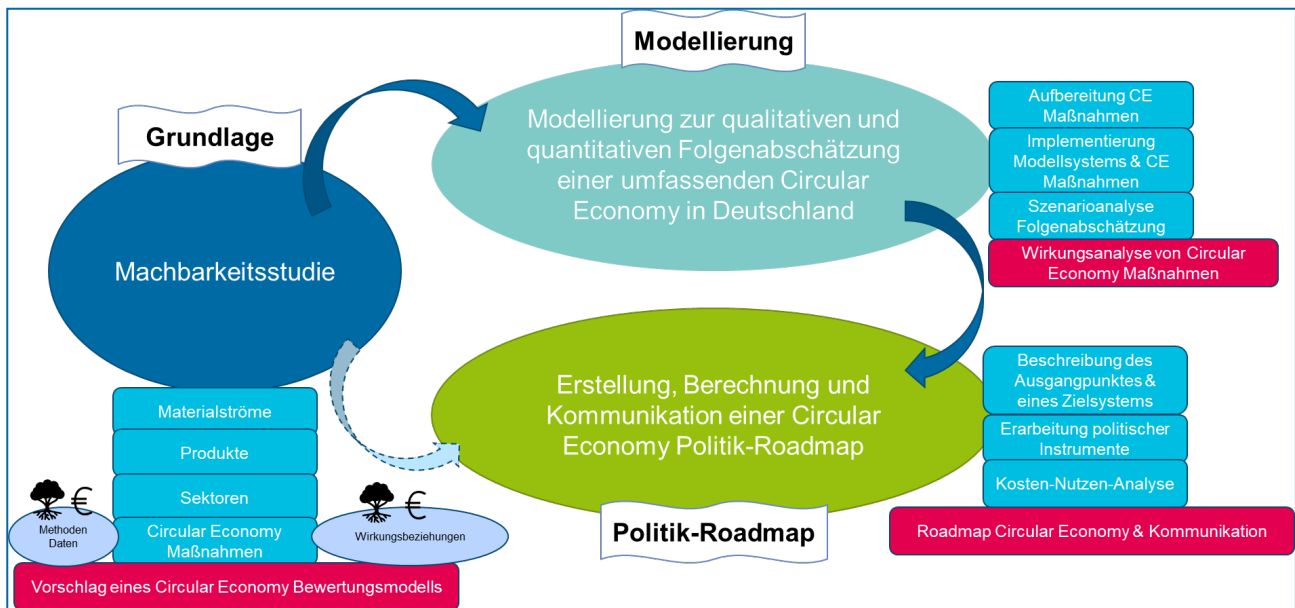
Circular Economy ist ein Konzept, das bei politischen Entscheidungsträger*innen und vielen Unternehmen als Alternative zur linearen Wirtschaft an Popularität gewinnt, auch im Hinblick auf die Reduzierung von Versorgungsrisiken für zukunftsrelevante Umwelttechnologien. Abschätzungen gehen davon aus, dass eine konsequent umgesetzte Circular Economy das Potenzial hat, die globalen Treibhausgasemissionen um knapp 40 % und den Verbrauch von Rohstoffen um knapp 30 % zu reduzieren (Circle Economy 2022). Außerdem sehen viele Studien große wirtschaftliche Vorteile wie Arbeitsplätze, Wachstum, Wertschöpfung und Innovation bei der Umsetzung einer Circular Economy (Europäische Kommission 2020). Entsprechend bildet die Circular Economy eine der zentralen Säulen des EU-Green Deals, auch als Beitrag zur Erreichung des Treibhausgasneutralitätsziels.

Die Bundesregierung hat es sich in ihrer Koalitionsvereinbarung zum Ziel gesetzt, eine neue, integrierte Kreislaufwirtschaftsstrategie zu entwickeln. Dieser Prozess ist wiederum im Kontext einer ambitionierten Klima- und Biodiversitätspolitik zu sehen, die die Verkehrs-, Agrar- und Energiewende vorantreibt. Eine ganzheitliche ökologische und ökonomische Folgeabschätzung einer Circular Economy existiert für Deutschland allerdings noch nicht. Es bedarf einer fundierten wissenschaftlichen Analyse, die Handlungsansätze in allen relevanten Schlüsselsektoren entwickelt und bewertet, dabei ein breites Spektrum von Zieldimensionen betrachtet und Zielkonflikte sowie Wechselwirkungen im Auge behält, um ganzheitlich sinnvolle Pfade zur Zielerreichung aufzuzeigen. Eine mithilfe einer robusten, wissenschaftlichen Analyse entwickelte Circular Economy-Strategie hätte bessere Chancen, resonanzfähig im politischen und gesellschaftlichen Diskurs zu sein.

Das Ziel der hier vorliegenden Studie ist, die methodischen und fachlichen Grundlagen für die ökologische und ökonomische Folgeabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen in relevanten Schlüsselsektoren zu prüfen. Darauf aufbauend sollen Empfehlungen für die Umsetzung eines Circular Economy-Bewertungsmodells für Deutschland abgeleitet werden.

Die Studie stellt den ersten Teil eines größeren Vorhabens des WWF Deutschland im Bereich Circular Economy dar (**Machbarkeitsstudie**). Auf der Grundlage der Analyse und Empfehlungen der hier vorliegenden Studie beabsichtigt der WWF Deutschland im zweiten Teil die **Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen** in relevanten Schlüsselsektoren zu initiieren. Anschließend möchte der WWF Deutschland unter Beteiligung von Akteuren aus Politik, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Wissenschaft eine **Politik-Roadmap** für eine Circular Economy in Deutschland entwickeln und an die Bundesregierung kommunizieren. Damit zielt der WWF Deutschland darauf ab, wirksam Einfluss auf die in der Koalitionsvereinbarung angekündigte nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie zu nehmen und eine zukünftige Circular Economy-Strategie maßgeblich mitzugestalten. Das vorgesehene Konzept des Gesamtvorhabens des WWF Deutschland ist in Abbildung dargestellt. Die Modellierung soll bis Dezember 2022 und die Entwicklung der Politik-Roadmap bis März 2023 abgeschlossen werden.

Abbildung 1: Konzept des Vorhabens „Modell Deutschland Circular Economy“ vom WWF Deutschland



Quelle: eigene Darstellung

Die hier vorliegende Machbarkeitsstudie behandelt folgende Aspekte:

- Identifizierung und Auswahl von aus Umweltsicht relevanten Schlüsselsektoren, Produkten und Materialien (Kapitel 3.2),
- Definition von ökologischen und ökonomischen Kenngrößen für die Modellierung (Kapitel 3.3),
- Definition und Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen nach festgelegten Kriterien wie Umweltentlastungspotenzial, Datenverfügbarkeit, mögliche Zielkonflikte und Wechselwirkungen, marktstrukturelle Voraussetzungen und Auswirkungen auf Unternehmen sowie Verbraucher*innen (Kapitel 3.4),
- Analyse existierender Circular Economy-Modelle, um Handlungsbedarf und Empfehlungen für das Bewertungsmodell Circular Economy Deutschland abzuleiten (Kapitel 3.5),
- Vorschlag eines Bewertungsmodells für die ökologische und ökonomische Folgeabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen in Deutschland (Kapitel 3.6),
- Beschreibung des Vorgehens für die Erstellung und Berechnung einer Politik-Roadmap für eine Circular Economy in Deutschland (Kapitel 3.7).

2 Methodisches Vorgehen

2.1 Definition einer übergeordneten Vision sowie einer Arbeitsdefinition für die Circular Economy

Die Identifizierung, Betrachtung und Priorisierung von Schlüsselsektoren, Produkten, Materialien und Maßnahmen setzt voraus, dass diese gegenüber einem Zielsystem für die Circular Economy bewertet werden. Ein gemeinsames Verständnis über die Vision und Zielsetzung beeinflusst die Auswahl der Circular Economy-Maßnahmen in den Schlüsselsektoren und hat methodische Implikationen für die Modellierung der ökologischen und ökonomischen Folgeabschätzungen. Die Schwerpunktsetzung der Circular Economy-Maßnahmen hat wiederum Auswirkungen auf die Wahl der Instrumente, die bei der Entwicklung der Politik-Roadmap in Betracht gezogen werden. Aus diesem Grund wurde zu Beginn der Studie eine Definition der Circular Economy mit dem WWF Deutschland abgestimmt. Konkret wurde die bestehende Definition von Circular Economy, wie seitens des WWF im Hinblick auf seine Fokussierung festgelegt, mit anderen Definitionen, die im politischen und wissenschaftlichen Diskurs verwendet werden, ausgewertet und kontextualisiert.

2.2 Scoping – Auswahl und Priorisierung von Sektoren, Produkten und Materialien für die Modellierung der Circular Economy

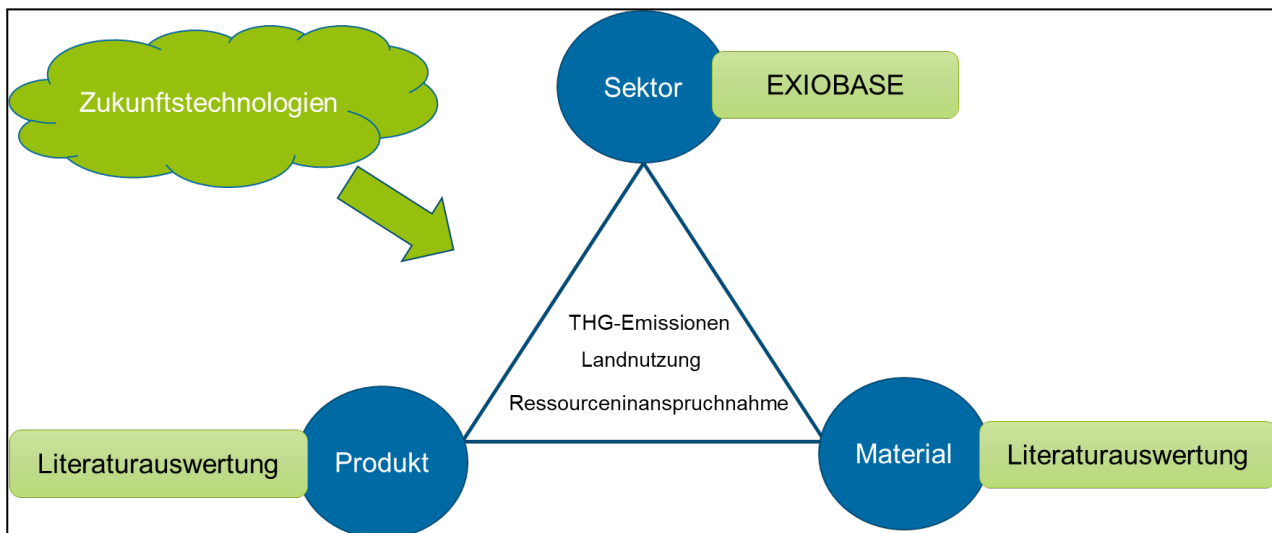
Ziel des Arbeitsschrittes ist es zu bestimmen, welche Sektoren, Produkte und Materialien signifikante globale Umweltauswirkungen haben und wo besonders große Potenziale und Bedarfe bestehen, um die Umwelt zu entlasten.

Im ersten Schritt wurde die erste Sektorauswahl auf Basis der Auswertung der multiregionalen Input-Output-Datenbank EXIOBASE getroffen. Da EXIOBASE mit historischen Daten arbeitet, wurde die Sektorauswahl mithilfe der Literaturanalyse zu Zukunftstechnologien erweitert.

Parallel wurde eine Literaturlauswertung durchgeführt, um umweltrelevante Produkte- und Dienstleistungen, vor allem aus der Konsumperspektive, zu identifizieren. Der Fokus der Analyse lag auf Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen, Ressourceninanspruchnahme und Landnutzung. Bei der Konsumperspektive werden die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des gesamten Produktlebenszyklus dem Land zugeordnet, in dem das Produkt verbraucht wird (**Verbrauchsfußabdruck**) oder dem/ der Verbraucher*in, der/die die Ware kauft (**Verbraucher*infußabdruck**). Dabei wird die Produktion von importierten Waren, die in Deutschland konsumiert werden, betrachtet und die Auswirkungen der Produktion von exportierten Waren ausgeschlossen. Die Ergebnisse der Auswertung der Produktstudien wurden mit der Sektorewahl abgeglichen und die Sektorauswahl ergänzt.

Die Auswahl der aus Umweltsicht relevanten Materialien wurde für die identifizierten Sektoren anhand einer Literaturrecherche durchgeführt. Die Materialien wurden, so weit wie möglich, den jeweiligen Sektoren und Produkten zugeordnet, um ihre Relevanz für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen sichtbar zu machen.

Zum Schluss wurde ein Baukasten bestehend aus Sektoren, Produkten und Materialien für die Modellierung zusammengestellt, mit dem Ziel, die relevanten Produkte und Materialien bei der Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen auf Sektorenebene zu berücksichtigen.

Abbildung 2: Auswahl von Sektoren, Produkten und Materialien

Quelle: eigene Darstellung

2.2.1 Sektorperspektive

2.2.1.1 Initialanalyse auf Basis von EXIOBASE

Für die Initialanalyse der Umweltwirkungen einzelner Sektoren kommt ein Modell zum Einsatz, das auf multiregionalen Input-Output (MRIO)-Tabellen basiert. Input-Output-Tabellen bilden die Lieferbeziehungen zwischen Wirtschaftsbereichen und den Zusammenhang zwischen diesen und der Endnachfrage (Konsum, Investitionen etc.) ab. Multiregionale Versionen stellen die Wirtschafts- und Endnachfragebereiche einzelner Länder bzw. Weltregionen zueinander in Beziehung und erlauben somit die Betrachtung komplexer internationaler Lieferketten (Tukker und Jansen 2006). Mithilfe von Umwelterweiterungen (environmental extensions, EE) können den wirtschaftlichen Aktivitäten Umweltwirkungen wie beispielsweise Rohstoffkonsum oder Luftemissionen zugewiesen werden (Abbildung 3). EE-MRIO-Tabellen basieren auf einem umfassenden theoretischen und empirischen Rahmen, der die Kompatibilität mit etablierten Systemen der volkswirtschaftlichen und ökologischen Gesamtrechnung gewährleistet (Tukker und Jansen 2006; Schaffartzik et al. 2014).

Unter den verfügbaren EE-MRIO-Datenbanken eignet sich EXIOBASE (vgl. Stadler et al. 2018) aufgrund seiner vergleichsweise hohen sektoralen Auflösung und detaillierten Umwelterweiterungen besonders gut für die Analyse von ökologischen, ökonomischen und – in gewissem Maße – sozialen Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten. Die aktuelle Version von EXIOBASE (v.3.8.2)¹ basiert auf detaillierten Wirtschafts- und Umweltdaten auf einer Aggregationsebene von 200 Produkten (aus 163 Branchen), 44 Ländern und 5 zusammengefassten Weltregionen. Die Umwelterweiterungen umfassen über 400 Emissionskategorien, 20 Kategorien der Flächennutzung, über 200 Kategorien der Rohstoffgewinnung und des Energieverbrauchs und über 100 Kategorien des Wasserverbrauchs (siehe Tabelle 21Tabelle 12 in Anhang IV für eine detaillierte Liste der in EXIOBASE erfassten Umweltkategorien).

¹ Für Detailinformationen, siehe <https://zenodo.org/record/4588235#.YKovTJAzQzM>; letzter Zugriff am 15.07.2022.

Die ursprüngliche EXIOBASE 3-Datenreihe wurde zwar nur bis einschließlich 2011 erstellt, doch wurden aktuellere EE-MRIO-Tabellen vor allem mithilfe von makroökonomischen Daten und Handelsdaten geschätzt. Die Endjahre der realen Datenpunkte der Umwelterweiterungen sind: 2015 Energie, 2019 alle Treibhausgase (Nicht-Brennstoffe, Nicht-CO₂ werden ab 2018 prognostiziert), 2013 Rohstoffe, 2011 die meisten anderen, einschließlich Landnutzung und Wasser. Auf der Grundlage dieser Endjahre wurde beschlossen, die produktspezifische Version der Datenreihen von 2015 zu verwenden, da sie genügend neue Datenpunkte enthält, um den Strukturwandel widerzuspiegeln, aber nicht zu sehr auf Extrapolationen beruht. EE-MRIO-Datenbanken weisen im Allgemeinen Verzögerungen auf, da sie aus verschiedenen Quellen zusammengestellt und anschließend umfassend harmonisiert werden müssen.

Abbildung 3: Schematische Darstellung eines EE-MRIO-Modells, zusammengefasst für Deutschland und den Rest der Welt (RoW)

Input Output		Intermediäre Inputs (Z)						Endnachfrage (Y)	
		DE			RoW			DE	RoW
Intermediäre Inputs (Z)	RoW								
	DE								
Umwelt- erweiterungen									

Quelle: eigene Darstellung

Die auf EE-MRIO basierende Methodik kann daher in erster Linie dazu verwendet werden, verschiedene Produktgruppen im Hinblick auf ihre ökologische, ökonomische und – in gewissem Maße – soziale Dimension zu charakterisieren. In gleicher Weise können die Wirkungen von Circular Economy-Maßnahmen, die diese Produktgruppen auf unterschiedliche Weise betreffen (von Erhöhung des Recyclinganteils in bestimmten Produkten bis hin zu Nachfragerückgängen im Zuge von Lebensdauerverlängerungen), abgeschätzt werden. Neben der Umweltdimension, die über die in Tabelle 21, Anhang IV, zusammengefassten Indikatoren abgedeckt wird, kann die wirtschaftliche Dimension durch verschiedene Indikatoren wie Endnachfrage, Bruttoproduktion und Handel ausgedrückt werden. Die soziale Dimension wird in EXIOBASE bisher nur durch die Beschäftigung abgebildet, die nach Geschlecht und drei verschiedenen Qualifikationsniveaus differenziert ist, und zudem prekäre Beschäftigung² ausweisen kann.

² Entsprechend der Definition der ILO (International Labor Organisation) (vgl. ILO Office 2009).

2.2.1.2 Zukunftstechnologien

Das vorausgehend beschriebene Verfahren zur Identifikation der relevantesten Sektoren basiert auf der Datenbank EXIOBASE. Diese arbeitet mit verfügbaren historischen Daten und kann daher die Verzahnung von ökonomischer Entwicklung, Materialflüssen und ökologischen Wirkungen nur mit einigen Jahren Zeitverzug rückwirkend abbilden. Diese Studie bereitet jedoch die Grundlagen für die Ausarbeitung von Circular Economy-Maßnahmen mit hohem Wirkungspotenzial, die jetzt für die kommenden Jahre angeschoben werden sollten. Es ist daher nötig, den historischen Blick aus EXIOBASE um erwartete zukünftige Entwicklungen im System aus Wirtschaftssektoren und Materialbedarf zu ergänzen. Dies geschieht durch eine Auswertung verfügbarer Studien zur zukünftigen technologischen Entwicklung. Dabei wurden auf eine möglichst hohe Aktualität der Studien sowie eine gute regionale Übertragbarkeit geachtet. Folgende Studien für Deutschland und die Europäische Union wurden ausgewertet:

- Marscheider-Weideman, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E. et al. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Berlin.
- Bobba, S.; Carrara, S.; Huisman, J.; Mathieux, F.; Pavel, C. (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study. Hg. v. European Commission (JRC).
- Abderrahim, A.; Monnet, A. (2018): Report on major trends affecting future demand for critical raw materials. Deliverable 2.2 of the SCRREEN project funded through the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 730227.

2.2.2 Produktperspektive

Für die Auswahl der umweltrelevanten Produkte und Dienstleistungen wurden v.a. Ökobilanzstudien und ausgewählte Modellierungsstudien auf der sektoralen Ebene ausgewertet (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** für die Literatur zur Analyse der Produktperspektive). Ziel dabei war es, eine Charakterisierung der Produkte durch Detailanalysen, z. B. für Bereiche, die unzureichend durch die Sektorperspektive abgebildet sind (z. B. Batterien), vorzunehmen. Die Auswertung der Studie erfolgte nach einem Bewertungsraster, das folgende Fragestellungen beinhaltete:

- Welche Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten wurden betrachtet?
- Werden Maßnahmen und Potenziale der Umweltentlastung ermittelt?
- Welche Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten wurden als prioritär identifiziert und Warum?
- Welche Umweltauswirkungen wurden betrachtet?
- Welche ökonomischen und volkswirtschaftlichen Aspekte wurden betrachtet?
- Welche Länder/Regionen wurden betrachtet? Lässt sich die Analyse auf Länderebene (Deutschland) unterbrechen?
- Welche Produkte und Dienstleistungen tragen maßgeblich zu hohen Umweltauswirkungen und ökonomischen Aspekten der prioritären Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten bei?

- Welche Lebenszyklusphasen tragen maßgeblich zu hohen Umweltauswirkungen und ökonomischen Aspekten der prioritären Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten sowie der relevanten Produkte und Dienstleistungen bei?
- Welche Materialien tragen maßgeblich zu hohen Umweltauswirkungen und ökonomischen Aspekten der prioritären Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten sowie der relevanten Produkte und Dienstleistungen bei?
- In welchen Sektoren / Materialien / Produkten / Handlungsfeldern werden besonders große Potenziale/ Bedarfe gesehen, um die Umwelt zu entlasten?
- Welche Maßnahmen wurden vorgeschlagen, um Umweltentlastungspotenziale zu realisieren?
- Wie wurde die Bewertung der Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten vorgenommen?
- Welche Modellierungs- und Simulationsansätze / Datengrundlagen / Datenbanken wurden verwendet?

2.2.3 Materialperspektive

Bei der Auswahl der Materialien, die bei der Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen von besonderer Bedeutung sind, wurden folgenden Kriterien herangezogen:

- Wirtschaftliche Bedeutung, Versorgungsrisiko
- Ökologische Kritikalität (Umweltgefährdungspotential)
- Massenrohstoffe (Verwendung in Deutschland)

Dazu wurden zunächst die wirtschaftlich besonders bedeutenden Materialien auf Grundlage der Arbeiten von (European Commission (DG DROW) 2017a, 2017b) zusammengestellt³. In diesen Arbeiten wird neben der Kritikalität der Rohstoffe auch das Versorgungsrisiko bewertet und zusätzlich auf die geologische Verfügbarkeit und die politischen Risiken in Bezug auf die Abbauländer eingegangen.

In der Modellierung sollen zusätzlich auch solche Materialien berücksichtigt werden, die aufgrund der ökologischen Auswirkungen beim Bergbau im Fokus stehen, auch dann, wenn deren wirtschaftliche Bedeutung nicht ganz so hoch ist. Hierzu wurden die Arbeiten in dem umfangreichen Projekt ÖkoRess des Umweltbundesamtes ausgewertet (Dehoust et al. 2020a; Dehoust et al. 2020b). Die Einordnung in Massenrohstoffe erfolgt wie im Projekt „Deutschland 2049“ des Öko-Instituts anhand der Verwendungsmengen in Deutschland (Buchert et al. 2017).

Zusätzlich erfolgt eine Zuordnung zu den ausgewählten Sektoren und den dort zu bilanzierenden Produkten.

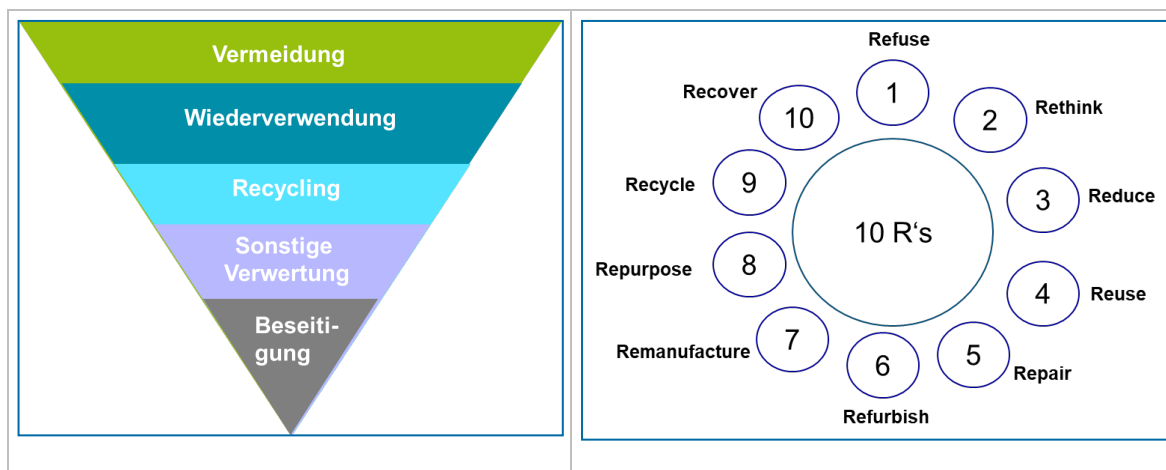
Die für die Analyse der Materialperspektive verwendete Literatur befindet sich in Anhang II.

³ Diese werden zu einem großen Teil auch in EXIOBASE abgebildet und bilanziert.

2.3 Identifizierung und Bewertung von sektorspezifischen Circular Economy-Maßnahmen

In diesem Arbeitsschritt wurden Circular Economy-Maßnahmen in ausgewählten Schlüsselsektoren anhand einer Literaturrecherche identifiziert. Zur Auswahl, Konsolidierung und Priorisierung von Circular Economy-Maßnahmen diente die mit dem WWF abgestimmte Definition der Circular Economy (Kapitel 3.1). Prinzipiell wurde bei der Identifizierung von Circular Economy-Maßnahmen die fünf-stufige Abfallhierarchie sowie 10-R-Strategien berücksichtigt. Ziel war dabei, die obersten Stufen zur Abfallvermeidung (Vermeidung, Wiederverwendung, Reparaturen, Substitution) prioritär gegenüber den unteren (Recycling, energetische Verwertung, Beseitigung) zu behandeln.

Abbildung 4: Orientierung für die Definition von Circular Economy-Maßnahmen



Quelle: eigene Darstellung

Zur Einschätzung des Aufwandes und der Komplexität für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen wurde jede einzelne Maßnahme einer qualitativen Bewertung durch das Projektteam unterzogen. Dabei wurden, wenn möglich, quantitative Angaben für die Bewertung hinterlegt. Ansonsten wurden die Bewertungsaussagen mit Literaturquellen unterstützt. In einigen Fällen wurde die Bewertung lediglich anhand vorhandener Expertise und Erfahrungen des Projektteams durchgeführt, da entweder keine Daten und Studien vorlagen oder sie nicht mit vertretbarem Aufwand ausgewertet werden konnten.

Die Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen anhand festgelegter Kriterien sollte nur eine erste Grundlage für die Entwicklung eines umfassenden Wirkungsmodells für die jeweiligen Sektoren in der Modellierungsphase bilden. Ziel war dabei, Bereiche mit besonders hohen Herausforderungen und Potenzialen möglichst sichtbar zu machen, um den Handlungsbedarf und Aufwand für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen in den jeweiligen Sektoren einzuschätzen. Die Liste von Circular Economy-Maßnahmen sowie die Bewertung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll in der Modellierungsphase ggf. ergänzt und konsolidiert werden, um die jeweiligen Wirkungsmodelle zum Zweck der Modellierung ausdifferenzieren.

Die Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen anhand festgelegter Kriterien erfolgte mit der Vergabe von Punkten von 1 bis 3, je nachdem ob das Kriterium für die jeweilige Circular Economy-Maßnahme negativ, moderat oder positiv bewertet wurde. Eine hohe Zahl (3) bedeutete eine positive Wirkung, eine niedrige Zahl (1) eine negative Wirkung. Die positiven und negativen Bewertungen wurden zusätzlich mit einer Farbkodierung versehen, um die Besonderheiten visuell sichtbar zu machen: grün für die Punktezahl 3, hellgrün für 2 und gelb für 1.

Die Kriterien und Systematik für die Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen sind im Folgenden dargestellt:

Abbildung 5: Systematik und Bewertungsschema für die Circular Economy-Maßnahmen

	Scores		
Bewertungskriterien	1	2	3
Umweltentlastungspotenzial	Geringe Relevanz bzgl. Materialnutzung	Moderate Relevanz bzgl. Materialnutzung	Hohe Relevanz bzgl. Materialnutzung
Auswirkungen auf Unternehmen	Negativ i.H. auf Kosteneffizienz oder Investitionen	Moderat i.H. auf Kosteneffizienz oder Investitionen	Positiv i.H. auf Kosteneffizienz oder Investitionen
Auswirkungen auf Verbraucher*innen	Negativ i.H. auf den Kaufpreis oder die Lebenszykluskosten	Moderat i.H. auf den Kaufpreis oder Lebenszykluskosten	Positiv i.H. auf den Kaufpreis oder Lebenszykluskosten
Zielkonflikte	Bedenklich i.H. auf nachteilige Nebenwirkungen	Moderat i.H. auf nachteilige Nebenwirkungen	Unbedenklich i.H. auf nachteilige Nebenwirkungen
Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen	Negativ i.S.v. gegenseitiger Beeinflussung	Moderat i.S.v. gegenseitiger Beeinflussung	Positiv i.S.v. gegenseitiger Beeinflussung
Datenverfügbarkeit	Schlecht i.S.v. Verfügbarkeit und Messbarkeit	Moderat i.S.v. Verfügbarkeit und Messbarkeit	Gut i.S.v. Verfügbarkeit und Messbarkeit
Technologische Reife	Nicht vorhanden	Fast vorhanden	Vorhanden
Marktstrukturelle Voraussetzungen	Schlecht i.S.v. Wettbewerbsfähigkeit zirkuläre Geschäftsmodelle	Moderat i.S.v. Wettbewerbsfähigkeit zirkuläre Geschäftsmodelle	Gut i.S.v. Wettbewerbsfähigkeit zirkuläre Geschäftsmodelle

Quelle: eigene Darstellung

Für die Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen verwendete Literatur befindet sich in Anhang III.

2.4 Einordnung der existierenden Modelle zur Bewertung der qualitativen und quantitativen Folgenabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde auch eine Einordnung von existierenden Modellen vorgenommen, in denen eine Abschätzung und Bewertung der qualitativen und quantitativen Folgen von Circular Economy-Maßnahmen vorgenommen wird. Damit soll die methodische und datenbezogene Anschlussfähigkeit des Circular Economy-Modells an vorangegangene Arbeiten sichergestellt werden. Zudem sollte der Frage nachgegangen werden, welche grundlegenden Modell- und Datenstrukturen, ggf. nach Adaption und zeitlicher Fortschreibung, übernommen werden könnten bzw. wo umfängliche Ergänzungen beispielsweise in der Detaillierung oder an Umweltwirkungsindikatoren vorgenommen werden müssten.

Die Auswertung der Modelle erfolgte nach einem einheitlichen Raster mit u. a. folgenden Kriterien:

- Zielsetzung

- berücksichtigte Bedürfnisfelder / Handlungsbereiche / Sektoren / Branchen / Wertschöpfungsketten
- betrachtete Umweltauswirkungen und -indikatoren
- betrachtete ökonomische Auswirkungen
- geographischer Rahmen
- verwendete Modellierungs- und Simulationsansätze, Datengrundlagen und Datenbanken

Aufgrund der Umfänglichkeit der Modelle (und der zitierten Literatur zur Begründung und Beschreibung der Modelle) und im eng gesteckten zeitlichen Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurden nach einem ersten größer angelegten Screening folgende Modelle näher ausgewertet:

- Umweltbundesamt:
Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie, <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- International Resource Panel:
Resource Efficiency and Climate Change. Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, <https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change>
- Umweltbundesamt:
Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (Klimaschutzpfade). CARE-Studie⁴

Die Analyse der existierenden Modelle diente zur Ableitung des Handlungsbedarfs und der Empfehlungen für die Entwicklung des Bewertungsmodells Circular Economy Deutschland.

⁴ Das Projekt befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes in Bearbeitung; Auftragnehmer des Umweltbundesamtes sind das Öko-Institut und Fraunhofer-ISI

3 Ergebnisse

3.1 Definition und Vision einer Circular Economy

Der Auftraggeber hat sein Verständnis der Circular Economy und der Ressourcenpolitik in zwei Veröffentlichungen (WWF 2020; WWF und Wuppertal Institut 2021) dargelegt:

“WWF defines a sustainable Circular Economy as a regenerative system, driven by renewable energy that replaces the current linear ‘take-make-dispose’ industrial model. Materials are instead maintained in the economy, resources are shared, while waste and negative impacts are designed out. A sustainable Circular Economy creates positive environmental and society-wide benefits and functions within planetary boundaries, supported by an alternative growth and consumption narrative.” (WWF 2020)

Der erste Teil der WWF-Definition ähnelt der Definition der Ellen MacArthur Foundation (2012)⁵, da hier auf den regenerativen Charakter der Circular Economy, z. B. durch die Nutzung erneuerbarer Energien, verwiesen wird und die Idee der grundlegenden Abkehr vom aktuellen linearen System in den Mittelpunkt gestellt wird. Demgegenüber hebt die Definition der Europäischen Kommission⁶ vor allem auf die Ressourceneffizienz ab: Zirkularität von Produkten und Materialien bedeutet für die Europäische Kommission, dass deren Wert so lange wie möglich erhalten bleibt, Abfall und Ressourcenverbrauch minimiert werden und dass am Lebensende eines Produkts aus diesem wieder Wert geschöpft werden soll.

Bei den Definitionen von WWF und Ellen MacArthur Foundation werden weitere Umweltziele angesprochen: Bei der Ellen MacArthur Foundation wird die Vermeidung von Schadstoffen aufgegriffen, beim WWF wird auf die planetaren Grenzen als Leitplanken für einen „systematischen Wertewandel hin zu mehr Kooperation und bewussterem Konsum“ hingewiesen, wo „Vermeidung von Ressourceneinsatz – nicht nur von Abfällen – an erster Stelle stehen“. So wird das in der Definition genannte „Narrativ“ in der Veröffentlichung von WWF und Wuppertal Institut (2021) beschrieben. Eine weitere in Deutschland relevante Definition der Circular Economy Initiative Deutschland⁷ nennt zusätzlich ganz explizit die Aufgabe der Circular Economy, zum Erreichen des EU-Ziels von „Netto-Null-Treibhausgasemissionen bis 2050“ beizutragen.

Wirtschaftliche Aspekte werden unterschiedlich angesprochen: Die Definition der Ellen MacArthur Foundation nennt zirkuläre Geschäftsmodelle, die Europäische Kommission weist auf den ökonomischen Nutzen der Circular Economy hin, indirekt sind ebenfalls zirkuläre Geschäftsmodelle gemeint, die Innovation, Wachstum und Beschäftigung mit sich bringen würden. Im Gegensatz dazu nennt der WWF vor allem Umwelt- und Gesellschaftsnutzen durch die Circular Economy und verweist auf

⁵ “[CE] an industrial system that is restorative or regenerative by intention and design. It replaces the ‘end-of-life’ concept with restoration, shifts towards the use of renewable energy, eliminates the use of toxic chemicals, which impair reuse, and aims for the elimination of waste through the superior design of materials, products, systems, and, within this, business models.” Ellen MacArthur Foundation 2012.

⁶ „In a circular economy, the value of products and materials is maintained for as long as possible. Waste and resource use are minimized, and when a product reaches the end of its life, it is used again to create further value. This can bring major economic benefits, contributing to innovation, growth and job creation”. European Commission 2020.

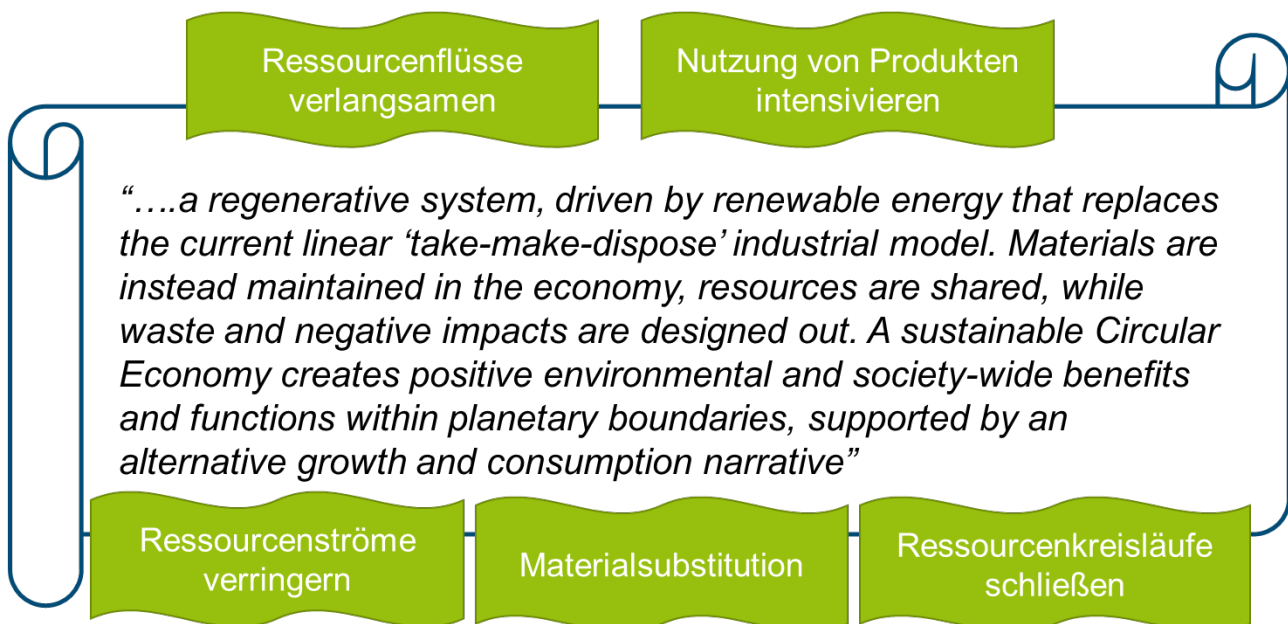
⁷ „Eine systemisch gedachte und nachhaltige Circular Economy trägt umfassend zu dem EU-Ziel von Netto-Null- Treibhausgasemissionen bis 2050 bei und ermöglicht eine absolute Entkopplung des Wirtschaftswachstums von Ressourcenverbrauch. Sie stellt die Einhaltung der planetaren Grenzen und der Nachhaltigkeitsziele sicher und trägt durch kollaborative, unternehmensübergreifende Wertschöpfung und Innovation zur Steigerung der Lebensqualität und Sicherung eines gerechten Wohlstands bei.“ Circular Economy Initiative Deutschland et al. 2021.

ein „alternatives Wachstumsnarrativ“. Dies wird als „ein Wechsel zu neuen Geschäftsmodellen“ beschrieben. Diese sollen (im Rahmen der planetaren Grenzen) „mit erheblich geringerem Ressourceneinsatz, insbesondere einem immer kleiner werdenden Primär Materialeinsatz, weiter Wertschöpfung generieren.“ (WWF und Wuppertal Institut 2021) Gemäß der Circular Economy Initiative Deutschland soll die Circular Economy „absolute Entkopplung des Wirtschaftswachstums von Ressourcenverbrauch“ erreichen und „Lebensqualität“ und „gerechten Wohlstand“ steigern.

Mit folgenden Handlungsstrategien lassen sich die Ziele einer Circular Economy weitestgehend verfolgen:

- **Ressourcenflüsse verlangsamen:** z. B. durch das Design von langlebigen Gütern (z. B. Multifunktionalität, Haltbarkeit, Modularität, Upgradebarkeit) und Verlängerung der Produktnutzungsdauer (z. B. durch Reparatur, Wiederaufbereitung);
- **Nutzung von Produkten intensivieren:** z. B. Maßnahmen, Geschäftsmodelle und Praktiken, die verschiedenen Formen des Teilens von Produkten (Sharing) und Konzepte der Kategorie „Product-as-a-Service“, also Leasing, anregen;
- **Ressourcenströme verringern** (Ressourceneffizienz) mit dem Ziel des Einsatzes von weniger Ressourcen pro Produkteinheit;
- **Materialsubstitution:** z.B. durch Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen, wo sinnvoll, oder Ersatz von Schadstoffen durch nachhaltigere Substanzen;
- **Ressourcenkreisläufe schließen:** z. B. durch hochwertiges werkstoffliches Recycling.

Abbildung 6: Definition, Vision und Handlungsstrategien einer Circular Economy



Quelle: eigene Darstellung

Die oben genannte Definition und die Handlungsstrategien bilden das gemeinsame Verständnis zur Vision einer Circular Economy. Diese Einordnung setzt Schwerpunkte für die potenziellen Circular Economy-Maßnahmen, s. Kapitel 3.4.). Sie bestimmt, welche Umweltwirkungen in den Blick genommen werden müssen, woraus sich methodische Implikationen für die Modellierung ergeben. Nicht

zuletzt definiert sie Leitplanken für die Vision und Handlungsstrategien zur Erstellung der Politik-Roadmap Circular Economy.

3.2 Circular Economy: Relevante Sektoren, Produkte und Materialien

3.2.1 Sektorperspektive

3.2.1.1 Ergebnisse EXIOBASE

Die Initialanalyse wurde aus zwei unterschiedlichen Perspektiven durchgeführt. Zum einen wurden die Umweltauswirkungen der sektoralen deutschen Endnachfrage, die entlang globaler Wertschöpfungsketten entstehen, beziffert (Konsumperspektive, s. Abbildung). Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse jeweils für die 20 Sektoren (von insgesamt 88 in dieser Aggregationsstufe) mit den höchsten Umweltwirkungen pro Kategorie dargestellt. Als Umweltkategorien wurden Treibhausgasemissionen, Ressourceninanspruchnahme und Landnutzung berücksichtigt.

Abbildung 7: Sektoriale Umweltwirkungen als Anteile der jeweiligen Gesamtmengen für Deutschland - Konsumperspektive

35-Electricity, gas, steam and air conditioning	10.6%	41-Buildings and building construction works	11.0%	10-Food products	21.9%
10-Food products	8.1%	10-Food products	10.1%	1-Products of agriculture, hunting and related services	13.9%
41-Buildings and building construction works	6.1%	84-Public administration and defence services	7.9%	2-Products of forestry, logging and related services	8.7%
19-Coke and refined petroleum products	5.1%	42-Constructions and construction works for civil engineering	6.6%	16-Wood and of products of wood and cork, except furniture	6.3%
51-Air transport services	4.8%	1-Products of agriculture, hunting and related services	6.0%	56-Food and beverage serving services	4.4%
42-Constructions and construction works for civil engineering	3.7%	35-Electricity, gas, steam and air conditioning	5.0%	20-Chemicals and chemical products	3.9%
20-Chemicals and chemical products	3.7%	43-Specialised construction works	4.4%	31-Furniture	3.4%
84-Public administration and defence services	3.6%	20-Chemicals and chemical products	3.5%	86-Human health services	2.2%
28-Machinery and equipment n.e.c.	3.5%	28-Machinery and equipment n.e.c.	3.2%	84-Public administration and defence services	2.2%
68-Real estate services	3.1%	19-Coke and refined petroleum products	2.7%	41-Buildings and building construction works	2.0%
1-Products of agriculture, hunting and related services	3.0%	23-Other non-metallic mineral products	2.7%	11-Beverages	1.9%
38-Waste collection, treatment and disposal services	2.9%	68-Real estate services	2.0%	55-Accommodation services	1.9%
43-Specialised construction works	2.4%	31-Furniture	2.0%	28-Machinery and equipment n.e.c.	1.8%
86-Human health services	2.1%	56-Food and beverage serving services	1.8%	14-Wearing apparel	1.8%
31-Furniture	2.0%	86-Human health services	1.7%	15-Leather and related products	1.4%
56-Food and beverage serving services	1.7%	27-Electrical equipment	1.4%	13-Textiles	1.4%
27-Electrical equipment	1.4%	25-Fabricated metal products, except machinery and equipment	1.4%	21-Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	1.3%
14-Wearing apparel	1.4%	6-Crude petroleum and natural gas	1.3%	22-Rubber and plastic products	1.3%
50-Water transport services	1.4%	29-Motor vehicles, trailers and semi-trailers	1.2%	42-Constructions and construction works for civil engineering	1.2%
29-Motor vehicles, trailers and semi-trailers	1.4%	2-Products of forestry, logging and related services	1.2%	87-Residential care services	1.1%
Summe Top 10	52%		60%		69%
Summe Top 20	72%		77%		84%

Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI mit EXIOBASE v.3.8.2. Ziffern vor Sektornamen entsprechen NACE Rev. 2.1 Codes.

Zum anderen werden die Umweltwirkungen der deutschen Produktion, unabhängig vom Ort ihrer letzten Verwendung, beziffert (Produktionsperspektive, s. Abbildung).

Die beiden Perspektiven können als komplementär angesehen werden, da mit ihnen Hotspots identifiziert werden können, für die sowohl konsumseitige als auch produktionsseitige Circular Economy-Maßnahmen relevant sind. Am Ende der Abbildung sind zudem die summierten Anteile der obersten 10 bzw. 20 Sektoren genannt. Es ist zu beobachten, dass die Top 20 jeweils bereits einen hohen Anteil an den Gesamtmengen ausmachen. Eine Konzentration auf einzelne Hotspots läuft daher nicht Gefahr, große Anteile der deutschlandweiten Umweltwirkungen außer Acht zu lassen.

Abbildung 8: Sektorale Umweltwirkungen als Anteile der jeweiligen Gesamtmengen für Deutschland - Produktionsperspektive

35-Electricity, gas, steam and air conditioning	14.5%	41-Buildings and building construction works	15.1%	10-Food products	14.1%
41-Buildings and building construction works	8.2%	84-Public administration and defence services	11.2%	2-Products of forestry, logging and related services	11.1%
10-Food products	6.3%	42-Constructions and construction works for civil engineering	9.0%	1-Products of agriculture, hunting and related services	8.1%
19-Coke and refined petroleum products	6.0%	35-Electricity, gas, steam and air conditioning	7.0%	20-Chemicals and chemical products	7.6%
84-Public administration and defence services	4.9%	10-Food products	6.7%	16-Wood and of products of wood and cork, except furniture	5.7%
42-Constructions and construction works for civil engineering	4.9%	43-Specialised construction works	6.0%	86-Human health services	4.6%
20-Chemicals and chemical products	4.7%	20-Chemicals and chemical products	4.6%	84-Public administration and defence services	4.5%
68-Real estate services	4.3%	1-Products of agriculture, hunting and related services	3.7%	41-Buildings and building construction works	4.1%
51-Air transport services	3.6%	19-Coke and refined petroleum products	3.1%	56-Food and beverage serving services	3.4%
38-Waste collection, treatment and disposal services	3.5%	68-Real estate services	2.9%	11-Beverages	3.0%
43-Specialised construction works	3.3%	86-Human health services	2.3%	21-Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	2.5%
86-Human health services	2.8%	23-Other non-metallic mineral products	1.9%	31-Furniture	2.5%
1-Products of agriculture, hunting and related services	1.7%	21-Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	1.5%	42-Constructions and construction works for civil engineering	2.4%
85-Education services	1.6%	38-Waste collection, treatment and disposal services	1.5%	68-Real estate services	2.3%
28-Machinery and equipment n.e.c.	1.6%	28-Machinery and equipment n.e.c.	1.4%	87-Residential care services	2.3%
21-Basic pharmaceutical products and pharmaceutical preparations	1.6%	56-Food and beverage serving services	1.4%	43-Specialised construction works	1.6%
87-Residential care services	1.4%	11-Beverages	1.2%	55-Accommodation services	1.5%
49-Land transport services and transport services via pipelines	1.3%	2-Products of forestry, logging and related services	1.2%	96-Other personal services	1.4%
53-Postal and courier services	1.3%	31-Furniture	1.2%	19-Coke and refined petroleum products	1.3%
56-Food and beverage serving services	1.2%	87-Residential care services	1.1%	85-Education services	1.1%
Summe Top 10	61%		69%		66%
Summe Top 20	79%		84%		85%

Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI mit EXIOBASE v.3.8.2. Ziffern vor Sektornamen entsprechen NACE Rev. 2.1 Codes

Aus der Initialauswertung der Umweltwirkungen aus Konsum- und Produktionsperspektive ergeben sich folgende Hotspot-Sektoren, die im Rahmen der Circular Economy relevant erscheinen und sich für eine tiefergehende Analyse eignen:

- ✓ Hoch- und Tiefbau

- ✓ Landwirtschaftliche Erzeugnisse
- ✓ Lebensmittel
- ✓ Chemikalien, inkl. Basiskunststoffe und Düngemittel
- ✓ Maschinenbau
- ✓ Möbel
- ✓ Fahrzeugbau
- ✓ Elektrische Ausrüstungen
- ✓ Textilien und Kleidung

Neben diesen Sektoren, die dem produzierenden Gewerbe zugewiesen werden, weisen die Stromerzeugung sowie Gas- und Wärmeversorgung einen hohen Anteil der Treibhausgasemissionen und der Ressourceninanspruchnahme auf. Jedoch ist dies hauptsächlich durch den hohen Verbrauch fossiler Brennstoffe bedingt und im Kontext der Circular Economy weniger relevant. Einige Dienstleistungssektoren wie die Öffentliche Verwaltung, Verteidigung und Dienstleistungen der gesetzlichen Sozialversicherung sowie Gesundheitsdienstleistungen weisen ebenfalls hohe Anteile in den obigen beiden Umweltkategorien auf. Dies kommt hauptsächlich durch die Größe dieser Sektoren und die damit einhergehende Infrastruktur sowie die Nachfrage nach Betriebsmitteln zustande. Relevant für die Circular Economy sind diese Sektoren daher hinsichtlich ihres potenziellen Hebels als große Nachfragesektoren und weniger hinsichtlich ihrer „Produkte“, die zirkulärer gestaltet werden könnten.

Diese Ergebnisse decken sich größtenteils mit den Erkenntnissen der Studie Strukturwandel zu einer Green Economy (Hünecke et al. 2022), die in Teilen ebenfalls auf Berechnungen mit EXIOBASE zurückgreift, jedoch auf eine ältere Version (v.3.3). Zudem sind die meisten im Circular Economy Action Plan der EU (Europäische Kommission 2020) genannten prioritären Produktgruppen abgedeckt (s. Tabelle 1). Im Unterschied zum CEAP sind jedoch Batterien und Verpackungen nicht unter den hier identifizierten Hotspots, da sie für sich genommen relativ geringe Umweltwirkungen im Vergleich zu den Gesamtmengen aufweisen. Batterien sind in der NACE Rev. 2.1-Klassifikation eine Unterkategorie der Elektrischen Ausrüstungen (Sektor Nr. 27): 27.2 - Batteries and accumulators. Sie sind daher mit EXIOBASE nicht vom restlichen Sektor getrennt zu betrachten und erfordern bei näherer Betrachtung somit eine getrennte Bottom-Up-Analyse. Verpackungen sind keine eigene Produktgruppe, sondern werden grob nach fünf konstituierenden Materialtypen kategorisiert (s. auch Abbildung):

1. Kunststoffe (22.22 - Plastic packing goods)
2. Papier und Karton (17.21 - Corrugated paper and paperboard and containers of paper and paperboard)
3. Holz (16.24 - Wooden containers)
4. Glas (13.13.1 - Bottles, jars, phials and other containers, of glass, except ampoules; stoppers, lids and other closures, of glass)
5. Metall (25.92 - Light metal packaging)

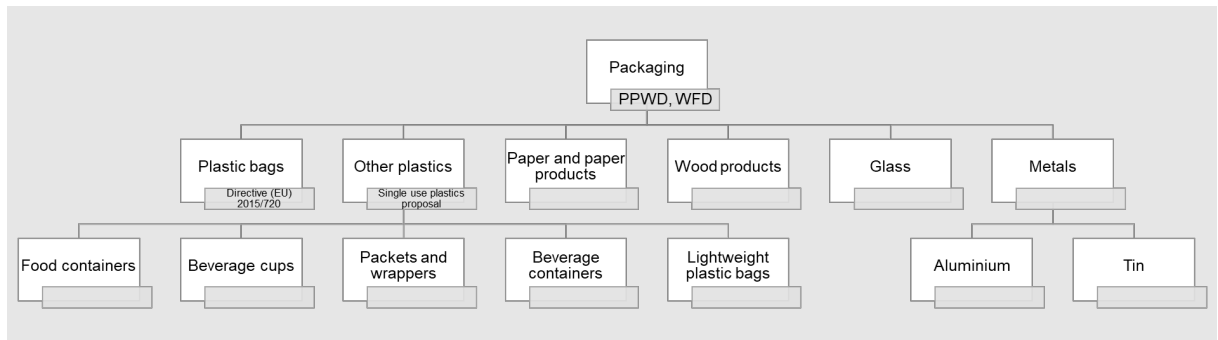
Verpackungen sind damit Teile der jeweiligen übergeordneten Sektoren und können innerhalb der Analyse mit EXIOBASE nicht getrennt ausgewiesen werden. Sie stellen im Einzelnen zwar keine Umwelthotspots dar, können aber ggfs. innerhalb getrennter Bottom-Up-Analysen (z. B. im Falle von Kunststoffverpackungen) betrachtet werden.

Tabelle 1: Vergleich der in dieser Studie identifizierten Sektoren mit dem EU Circular Economy Action Plan und der Studie "Strukturwandel zu einer Green Economy"

Modell Deutschland Circular Economy - Initialauswertung EXI-OBASE	EU Circular Economy Action Plan		Studie Ökologischer Strukturwandel (Top 8 Branchen: Ökologischer Relevanz + Betroffenheit von Megatrends)	
Hochbau	Ja	Bauwirtschaft und Gebäude	Ja	Bauwirtschaft
Tiefbau	Ja	Bauwirtschaft	Ja	Bauwirtschaft
Landwirtschaftliche Erzeugnisse	Ja	Lebensmittel, Wasser und Nährstoffe	Ja	Landwirtschaft
Lebensmittel	Ja	Lebensmittel, Wasser und Nährstoffe	Ja	Lebensmittel- und Ernährungswirtschaft
Chemikalien	Ja	Erwähnung unter „high impact intermediary products“	Ja	Chemieindustrie
Maschinenbau	Nein	Keine explizite Erwähnung	Ja	Maschinenbau
Möbel	Ja	Erwähnung in Text; Aufnahme in Ecodesign for Product Sustainability Regulation (EPSR)	Nein	Relevante Kategorien sind Wasserentnahme, NH ₃ , NMVOC, SO _x , PM ₁₀ , PM _{2,5}
Fahrzeuge	Ja	Fahrzeuge	Ja	Fahrzeugbau
Elektrische Ausrüstungen	Ja	Batterien	Nein	Moderate Auswirkung in Bezug auf THG-Emissionen, Ressourceninanspruchnahme & Landnutzung
Textilien & Kleidung	Ja	Textilien	Nein	Moderate Auswirkung in Bezug auf THG-Emissionen, Ressourceninanspruchnahme & Landnutzung
Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Sozialversicherung	Nein	Erwähnung der Wichtigkeit von Dienstleistungen, aber keine Benennung einzelner Hotspots	Ja	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung, Dienstleistungen der gesetzl. Sozialversicherung
Dienstleistungen des Gesundheitswesens	Nein	Erwähnung der Wichtigkeit von Dienstleistungen, aber keine Benennung einzelner Hotspots	Ja	Gesundheitsdienstleistungen und Soziale Arbeit

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 9: Grobeinteilung von Verpackungstypen



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer ISI

Ggfs. werden auch Bottom-Up-Analysen für Kunststoffe durchgeführt. Basiskunststoffe werden vorrangig zu Kunststoffprodukten weiterverarbeitet, aber auch in Fahrzeugen, Elektronik, elektrischen Geräten, Maschinen, medizintechnischen Geräten, Möbeln etc. verwendet. Kunststoffprodukte werden wiederum hauptsächlich im Hoch- und Tiefbau, Fahrzeug- und Maschinenbau, in Möbeln, elektrischen Geräten und Metallprodukten verwendet.

Aus den oben erwähnten Überlegungen kann eine Initialliste der zu betrachtenden Sektoren für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen erstellt werden (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Tabelle 2: Auswahl der zu betrachtenden Sektoren

NACE Rev. 2.1 Code	Sektor
41	Buildings and building construction works
42	Constructions and construction works for civil engineering
43	Specialised construction works
10	Food products
1	Products of agriculture, hunting and related services
20	Chemicals and chemical products
- 20.16	- Plastics in primary forms (>90 % der Umweltwirkungen)
28	Machinery and equipment n.e.c.
29	Motor vehicles, trailers and semi-trailers
31	Furniture
27	Electrical equipment
- 27.2	- Batteries and accumulators (Bottom-Up-Analyse notwendig)
13	Textiles
14	Wearing apparel

Quelle: eigene Darstellung

3.2.1.2 Zukunftstechnologien

Das Ergebnis in Form einer Liste mit eventuell zu berücksichtigenden technologischen Trends ist nach Sektoren geordnet in Tabelle 3 dargestellt. Die betrachteten Studien sind allerdings auf kritische Rohstoffe ausgelegt. Mögliche zukünftige Trends wie holzbasierendes Bauen sind daher nicht abgedeckt.

Tabelle 3: Übersicht der für die nächsten Jahre und Jahrzehnte erwarteten technologischen Entwicklungen und Trends für verschiedene Sektoren⁸.

Sektor	Bereich	Technologischer Trend	Betroffene Rohstoffe
Energie	Erneuerbare Energien	Windenergieanlagen Photovoltaik Thermoelektrische Generatoren	Kupfer, leichte + schwere Seltene Erdelemente (Rare Earth Elements, REE) Gallium, Indium, Kupfer
	Gaskraftwerke	Turbinen (Superlegierungen)	Kobalt, Ruthenium, Rhenium, Tantal, Titan, Zirkonium
	Wasserstoff	Elektrolyse	Kobalt, Kupfer, Iridium, Platin, Scandium, Lanthan, Yttrium, Titan, Zirkonium
		Brennstoffzellen	Kobalt, Kupfer, Scandium, Lanthan, Yttrium, Zirkonium
	Energiespeicherung	Lithiumionenbatterien Redox-Flow-Speicher	Graphit, Kobalt, Lithium Vanadium
Elektronik	Energietransport	Ausbau der Stromnetze	Kupfer
		Induktive Energieübertragung	Kupfer
	IKT	Rechenzentren	Kobalt, Kupfer, Ruthenium, Platin, leichte REE, Tantal
		Quantencomputer	Kupfer
	Haushaltsgeräte	Digitalisierung/ Vernetzung	
	Displays	LCD OLED	Indium
	Vernetzung	Internet of Things	
		Glasfaser	Germanium
		5G/6G	
		Radiofrequenz-Mikrochips	Gallium, Lithium, Tantal

⁸ Voraussichtlich mit besonders großen physischen Materialmengen verknüpfte Trends sind hervorgehoben.

Sektor	Bereich	Technologischer Trend	Betroffene Rohstoffe
	Sensoren		
Transport	Elektrofahrzeuge	Lithiumionenbatterien	Graphit, Kobalt, Lithium, Nickel, Kupfer
		Feststoffbatterien	Kobalt, Kupfer, Lithium, Titan
		Elektrische Traktionsmotoren	Kupfer, leichte + schwere REE
	Flugzeuge	Turbinen (Superlegierungen)	Kobalt, Ruthenium, Rhenium, Tantal, Titan, Zirkonium
		Drohnen	Germanium, Kupfer, Lithium, leichte REE
		Synthetische Kraftstoffe	Kobalt, Ruthenium
		Leichtbau	Silber, Kupfer, Lithium, Titan
	Fahrzeuge	Leichtbau Automatisches Fahren	Leichte REE, Yttrium
Industrie	Roboter		
	Digitalisierung/Vernetzung		
	3D Druck		Kobalt, Titan
Landwirtschaft	Düngemittel	Phosphatgewinnung⁹	Phosphor
	Bioökonomie	Biobasierte Kraftstoffe/Chemie	
Weitere	Dekarbonisierung	Direct Air Capture	Kobalt
		Carbon Capture & Storage	Kobalt, Kupfer, Vanadium

Quelle: eigene Darstellung

Die physischen Stoffströme solcher technologischen Entwicklungen abzuschätzen, ist nicht trivial und bedarf sorgfältiger Szenarienarbeit. Studien, die diesen Systemänderungen bereits Umweltwirkungen zuweisen, sind selten und meist nicht sektorübergreifend. Als machbare Annahme zur Einschätzung des möglichen Potenzials von Circular Economy-Maßnahmen in diesen sich ändernden Technologiefeldern wird daher die erwartete Materialmenge verwendet. Ist der Stoffstrom groß, kann davon ausgegangen werden, dass durch den gezielten Einsatz von Circular Economy-Maßnahmen auch signifikante Beiträge zur Minderung der Umweltwirkungen deutschlandweit erzielt werden können.

Nicht überraschend sollten mit Windenergieanlagen, Lithiumionenbatterien/Feststoffbatterien und Elektromotoren typische Technologien der Energie- und Verkehrswende berücksichtigt werden. Oft

⁹ Hier kann die technologische Änderung auf Phosphat-Rückgewinnung bereits als eine Circular Economy-Maßnahme definiert werden.

übersehen wird der nötige Ausbau der Stromnetze, der mit signifikanten Materialbedarfen einhergeht.

Die Wasserstofftechnologien der Elektrolyse und Brennstoffzelle sowie die Energiespeicherung mithilfe von Redox-Flow-Batterien sind mit noch größeren Unsicherheiten hinsichtlich ihrer wahrscheinlichen Verbreitung verbunden. Je nach Szenario sind sie nicht von Bedeutung oder verursachen größere Materialbedarfe.

Eine Technologie zur Steigerung der Materialeffizienz könnte der Leichtbau im Fahrzeug- und Flugzeugbau sein. Diese Technologie könnte jedoch eine signifikante Verlagerung von Materialströmen auf andere Materialien hervorrufen. Dies sollte bei der Konzeption von Circular Economy-Maßnahmen im wichtigen Mobilitätssektor und bei der Beurteilung der entsprechenden Wirkungen Berücksichtigung finden.

Auf Grund der Lebensnotwendigkeit, begrenzten Verfügbarkeit und unmöglichen Substitution von Phosphor ist die Phosphorgewinnung bereits in Diskussion. Der technologische Trend ist hier an sich schon die Kreislaufführung in Form von Phosphorrückgewinnung aus sekundären Quellen.

3.2.1.3 Auswahl von Sektoren

Auf Grundlage der Analysen mithilfe der EXIOBASE-Datenbank (Kapitel 3.2.1.1) und von Zukunftstechnologien (3.2.1.2) sowie der Studien zur Identifizierung von umweltrelevanten Produkten und Dienstleistungen im folgenden Kapitel 3.2.2 wurden elf Sektoren für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen ausgewählt (Abbildung). Da die Bezeichnung von Sektoren in unterschiedlichen Datenbanken und Studien nicht einheitlich ist, wurden sie zum Zweck dieser Studie konsolidiert.

Abbildung 10: Vorschlag von Sektoren für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen



Quelle: eigene Darstellung

Bei der Auswahl von Sektoren sind folgende Aspekte zu betrachten:

1. Der Sektor zur Stromerzeugung sowie Gas- und Wärmeversorgung wurde nicht ausgewählt, da er wenig Relevanz für die definierten Handlungsstrategien einer Circular Economy (s. 3.1) und für die zu definierenden Circular Economy-Maßnahmen (s. 3.4) aufweist.

2. In EXIOBASE bedingen "plastics, basic" den Hauptanteil der Umweltwirkungen im Sektor Chemikalien. Aus Konsumperspektive sind Kunststoffe, Chemikalien und chemische Produkte für die Modellierung den Endnachfragesektoren (z. B. Hoch- und Tiefbau, Fahrzeuge, IKT, Haushaltsgeräte, Verpackungen usw.) zuzuordnen. Für die Modellierung werden Circular Economy-Maßnahmen zwar auf Ebene der Endnachfragesektoren formuliert (siehe Kapitel 3.4), aber die ökologischen und ökonomischen Folgeabschätzungen auch für die Sektoren der „Vor- und Zwischenprodukte“ wie Kunststoffe, Chemikalien und Chemische Produkte modelliert.
3. Beim Maschinenbau zählen viele Maschinen als Investitionsgüter von Unternehmen und daher als Endnachfrage in EXIOBASE. Ähnlich wie bei Chemikalien und Kunststoffen sind Zwischenprodukte aus dem Maschinenbau für die Modellierung den Endnachfragesektoren wie Hochbau, Fahrzeuge, IKT, Haushaltsgeräte, Möbel usw. zuzuordnen und die Auswirkungen bei der Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen auch hinsichtlich dieser Sektoren zu bewerten.
4. Produkte der Land-, Jagdwirtschaft und zugehörige Dienstleistungen werden teilweise direkt konsumiert und teilweise vom Lebensmittelsektor weiterverarbeitet. Dabei geben private Haushalte in etwa viermal so viel für verarbeitete Lebensmittel wie für Produkte aus, die direkt von der Landwirtschaft bezogen werden (wie etwa frisches Gemüse). Die hohen Umweltwirkungen kommen u. a. durch die schiere Größe des Landwirtschaftssektors und der damit einhergehenden Ressourcen- (v.a. Brennstoffe) und Landinanspruchnahme zustande. Wir schlagen vor, diesen Sektor bei der Modellierung dem Endnachfragesektor Lebensmittel zuzuordnen.
5. „Specialised Construction Works“ betreffen vorbereitende Arbeiten in Baustellen, den Innenausbau etc. und sind entsprechend dem Hoch- und Tiefbau zuzuordnen.

3.2.2 Produktperspektive

Die folgende Tabelle 4 stellt die Ergebnisse der Bewertung der Studien zur Identifizierung von umweltrelevanten Produkten und Dienstleistungen dar. Bei der Zusammenstellung der Produkte und Dienstleistungen wurden vor allem Treibhausgaspotenzial, Ressourceninanspruchnahme und Landnutzung berücksichtigt. Die Produkte sind, soweit möglich, den im Kapitel 3.2.1.3 vorgeschlagenen Schlüsselsektoren zugeordnet. Ein Anspruch auf eine scharfe Trennung und Zuordnung sowie auf Vollständigkeit besteht hier nicht.

Tabelle 4: Umweltrelevante Produkte, Anwendungen und Dienstleistungen

Sektoren	Produkte/ Anwendungen
Verpackungen	Kunststoffe, Glas, Weißblech, Papier, Pappe, Karton
Batterien	Siehe Sektoren IKT und Fahrzeuge.
IKT & Haushaltsgeräte	Kabel, Batterien, Kunststoffe, Magnete, TV-Geräte, Telekommunikationsnetze (einschließlich Glasfaser, Laser), Displays, Radiofrequenz-Mikrochips, Rechenzentren, mobile Endgeräte (z. B. Smartphones, Tablets, Notebooks), Geschirrspüler, Waschmaschinen, Kühl- und Gefriergeräte, Heizung, Lüftung und Klimatisierung
Fahrzeuge	Automobile, sonstige Fahrzeuge (v.a. schwere Nutzfahrzeuge), Batterien, elektrische Traktionsmotoren, Katalysatoren, Gehäuse, Reifen, Kunststoffkomponente,

Sektoren	Produkte/ Anwendungen
	Elektrotechnik, Motor, Getriebe, andere mechanische Bauteile, Edelstahl, Verzinkungen, Glas; Schmieröle, -fette,
Hochbau	Gebäude, Fenster, Elektrotechnik, Beton, Zement, Glas, Keramik, Rohre, Installationen, Kunststoffe, Verzinkungen, Beleuchtung, Metallurgie
Tiefbau	Asphalt, Beton, Zement, Ingenieurbau, Kunststoffe, (Verkehrsinfrastruktur)
Lebensmittel	Fleisch- und Molkereiprodukte, verarbeitete Produkte, Getränke, Futtermittel, Düngemittel, Pestizide und andere chemische Hilfsmittel wie beispielsweise Halmverkürzer, Antibiotika, Treibstoffe, Kunststoffe (inkl. Verpackung), hier im Wesentlichen abiotische Rohstoffe, Kühlmittel
Textilien	Naturfaser, synthetische Faser und Regeneratfaser, Chemikalien
Möbel	Kunststoffe, Beschläge, Glas
Beleuchtung	Leuchtdiode (Light-Emitting Diode; LED)

Quelle: eigene Darstellung

3.2.3 Materialperspektive

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde eine Prüfung vor allem in Bezug auf die abiotischen Rohstoffe durchgeführt. Biotische Rohstoffe werden im Rahmen der Durchführung der Modellierung in der nächsten Phase berücksichtigt, soweit sie für die betrachteten Szenarien relevant sind. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass bestimmte abiotische Rohstoffe im Verlaufe des Lebenszyklus in Biomasse eingebaut werden. Dies gilt vor allem für den Bereich pflanzenfaserbasierter Textilien, aber auch den Bereich Lebensmittel. Entsprechend werden auch Circular Economy-Potenziale für organische Substanzen (z. B. organische N-Dünger) betrachtet.

Unter den abiotischen Rohstoffen werden 59 Erze und Metalle (7 Eisenmetalle, 8 Nicht-Eisenmetalle, 8 Edelmetalle und 36 Technologiemetalle), 9 Industriematerialien und 7 Baumaterialien zusammengefasst (Buchert et al. 2017).

3.2.3.1 Massenrohstoffe (Verwendung in Deutschland)

Besonders hohe Reduktionspotenziale beim Ressourcenverbrauch existieren bei den Rohstoffen, die in hohen Mengen verwendet werden. Buchert et al. (2017) definierten als Masserohstoffe diejenigen Rohstoffe und Materialien, deren Verwendung in Deutschland 100.000 t/a oder mehr betragen. Dazu gehören die **Baumaterialien**

- Kies,
- Sand,
- Naturstein,
- gebrannter Kalk,
- Zement,
- Gips und
- Tone,

die **Industriematerialien**

- Kalisalze,
- Flussspat
- Baryt
- Phosphat
- Steinsalze,
- Schwefel und
- Spezialsande,

die **Eisenmetalle**

- Eisen,
- Chrom und
- Mangan

sowie die **Nicht-Eisenmetalle**

- Aluminium,
- Kupfer,
- Zink und
- Blei.

3.2.3.2 **Wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko**

Bei der Ermittlung der Rohstoffkritikalität werden von der EU-Kommission (European Commission (DG DROW) 2017a, 2017b) die Parameter Wirtschaftliche Bedeutung (Economic Importance EI) und Versorgungsrisiko (Supply Risk SR) als wichtige Zwischenergebnisse ermittelt.

Die wirtschaftliche Bedeutung wird bei der EU-Methode auf der Grundlage der Bedeutung eines bestimmten Materials bzw. Rohstoffs für die Endanwendungen in der EU und auf Basis der Verfügbarkeit von Ersatzstoffen in diesen Anwendungen berechnet. Das Versorgungsrisiko wird dabei auf der Grundlage von Faktoren berechnet, die das Risiko einer Unterbrechung der Versorgung mit einem bestimmten Material bemessen (z. B. globale Versorgung und EU-Beschaffungsländer-Mix, Importabhängigkeit, Leistung der Lieferländer gemessen am World Governance Indicator, Handelsbeschränkungen und -abkommen, Verfügbarkeit und Kritikalität von Ersatzstoffen). Demnach werden Rohstoffe als kritisch eingestuft, wenn sie auf der Kritikalitätsschwelle bezüglich wirtschaftlicher Bedeutung mindestens 2,8 und bezüglich des Versorgungsrisikos mindestens 1 erreichen.

3.2.3.3 **Ökologische Kritikalität (Umweltgefährdungspotential)**

Da bislang die ökologischen Aspekte des Bergbaus bei der Rohstoffkritikalität gar nicht oder nur unzureichend bewertet wurden, wurde in dem Projekt ÖkoRess des Umweltbundesamts ein qualitatives Bewertungssystem entwickelt, mit dem das Umweltgefährdungspotential von 47 Rohstoffen

oder Rohstoffgruppen in Bezug auf ihre Gewinnung bestimmt werden konnte. Dazu wurden technische, geologische und Standortfaktoren ausgewertet und zusammen mit einem fünfstufigen Bewertungssystem (hoch – hoch bis mittel – mittel – gering bis mittel – gering) zum aggregierten Umweltgefährdungspotenzial eingeordnet. Zusätzlich wurden Einschätzungen zur Umwelt-Governance der Förderländer gegeben und das weltweite Maß an Material- (Kumulierter Rohstoffaufwand, KRA) und Energieströmen (Kumulierter Energieaufwand, KEA), die mit der Förderung und Aufbereitung der Rohstoffe verbunden sind, ermittelt. Insgesamt wiesen 21 Rohstoffgruppen oder Rohstoffe ein hohes und weitere acht ein hohes bis mittleres aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial auf (Dehoust et al. 2020a).

3.2.3.4 Wirtschaftlich bedeutende Rohstoffe mit hohem Versorgungsrisiko und Umweltgefährdungspotenzial

In Abbildung 5 werden alle Rohstoffe aufgeführt, die entweder gemäß der EU-Kommission (European Commission (DG DROW) 2017a, 2017b) als kritische Rohstoffe eingestuft sind, die zu den Massenrohstoffen gemäß Buchert et al. (2017) gehören oder gemäß Dehoust et al. (2020a) mit einem hohen aggregierten Umweltgefährdungspotenzial bewertet wurden.

Tabelle 5: Wirtschaftlich bedeutende Rohstoffe (einschließlich Massenrohstoffe) mit hohem Versorgungsrisiko und Umweltgefährdungspotenzial, sortiert nach abnehmender wirtschaftlicher Bedeutung

Rohstoffe	Kritische Rohstoffe	Versorgungsrisiko	Wirtschaftliche Bedeutung	Umweltgefährdungspotenzial
Wolfram	ja	1,8	7,3	M-H
Magnesium	ja	4,0	7,1	M
Chrom		0,9	6,8	M
Aluminium*		0,5	6,5	M-H
Eisen, Eisenerz*		0,8	6,2	M
Mangan		0,9	6,1	M
Kobalt	ja	1,6	5,7	H
Naturkautschuk	ja	1,0	5,4	n.b.
Molybdän		0,9	5,2	H
Phosphat	ja	1,0	5,1	H
Platingruppenmetalle (PGM)*	ja	2,5	5,0	Siehe Platin, Palladium, Rhodium
Niob	ja	3,1	4,8	M-H
Kalisalz		0,6	4,8	L
Nickel*		0,3	4,8	H

Rohstoffe	Kritische Rohstoffe	Versorgungs- risiko	Wirtschaftliche Bedeutung	Umweltgefährdungspoten- tial
Kupfer*		0,2	4,7	H
Schwefel		0,6	4,6	n.b.
Selen		0,4	4,5	H
Zink*		0,3	4,5	H
Phosphor	ja	4,1	4,4	n.b.
Antimon	ja	4,3	4,3	H
Titan		0,3	4,3	M
Flussspat	ja	1,3	4,2	L
Hafnium	ja	1,3	4,2	n.b.
Beryllium	ja	2,4	3,9	M-H
Tantal	ja	1,0	3,9	I-m
Silizium	ja	1,0	3,8	n.b.
Silber*		0,5	3,8	H
Scandium	ja	2,9	3,7	M-H
Vanadium	ja	1,6	3,7	H
Blei*		0,1	3,7	H
Kalkstein*		0,1	3,7	n.b.
Leichte Seltene Erden	ja	5,0	3,6	H
Bismut	ja	3,8	3,6	H
Germanium	ja	1,9	3,5	H
Tellur		0,7	3,4	H
Gallium	ja	1,4	3,2	M-H
Borate	ja	3,0	3,1	M-H
Schwere Seltene Erden	ja	2,4	3,1	M-H
Indium	ja	2,4	3,1	H
Grafit	ja	2,9	2,9	L
Baryt	ja	1,6	2,9	n.b.
Helium	ja	1,6	2,8	n.b.

Rohstoffe	Kritische Rohstoffe	Versorgungsrisiko	Wirtschaftliche Bedeutung	Umweltgefährdungspotenzial
Quarzsand		0,3	2,6	M-H
Kaolin*		0,5	2,3	L
Bausand & Kies*		0,2	2,3	n.b.
Gips*		0,5	2,2	M
Bentonit		0,2	2,1	n.b.
Rhenium		1,0	2,0	H
Gold*		0,2	2,0	H
Palladium	Siehe PGM			H
Platin	Siehe PGM			H
Rhodium	Siehe PGM			H
Zement	n.b.			n.b.

Spalte Rohstoffe: Fett gedruckt und grau hinterlegt = Massenrohstoffe * in EXIOBASE bilanziert

Spalte Versorgungsrisiko: braun hinterlegt = Schwellenwert ist ≥ 1

Spalte Wirtschaftliche Bedeutung: braun hinterlegt = Schwellenwert ist $\geq 2,8$

Spalte Umweltgefährdungspotenzial: rot hinterlegt = hoch, braun hinterlegt = hoch bis mittel

n.b. = nicht bewertet, Die PGM wurden als Gruppe nicht in Bezug auf das Umweltgefährdungspotenzial bewertet

Nach Dehoust et al. (2020a), Buchert et al. (2017) und European Commission (DG DROW) (2017a, 2017b)

Die bewerteten Materialien wurden in verschiedene Kategorien eingruppiert, wie in Abbildung 11 ausgeführt.

Abbildung 11 Gruppierung von Materialien/Rohstoffen nach Umweltgefährdungspotenzial und Kritikalität

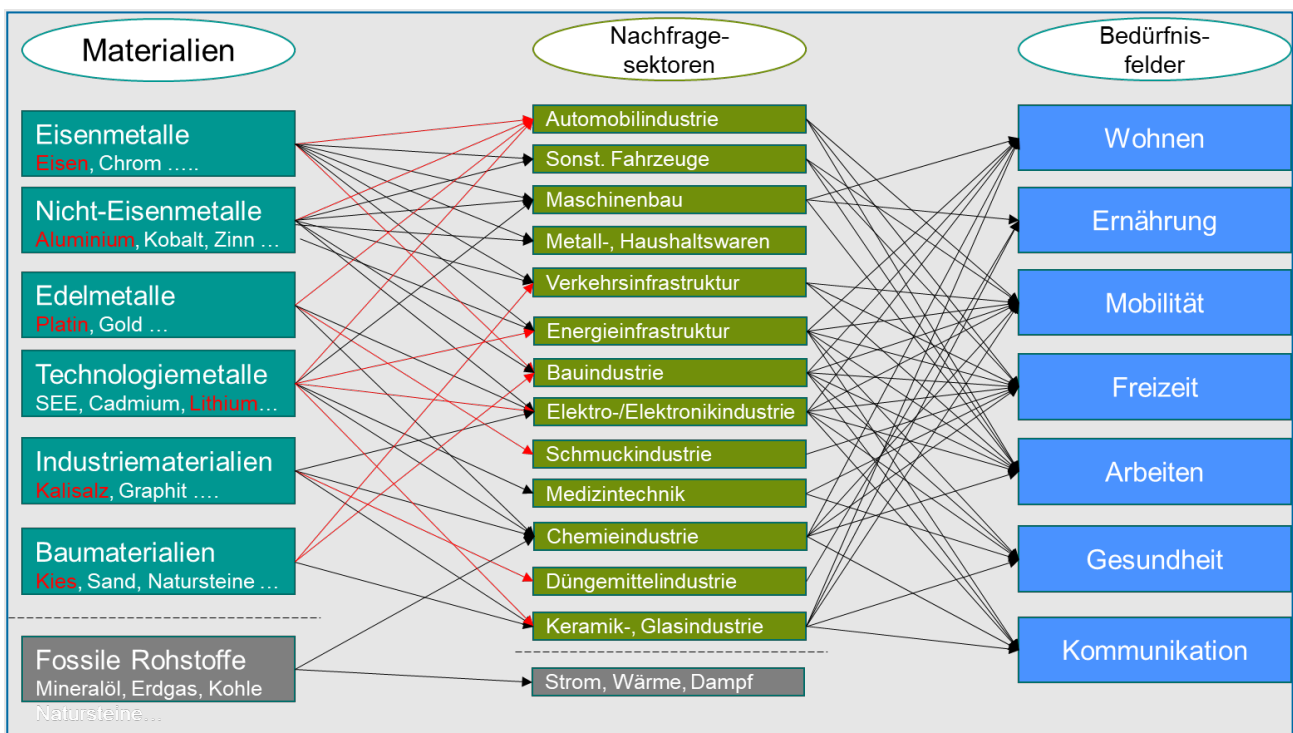
Gruppierung in verschiedene Kategorien	Materialien/Rohstoffe
Massenrohstoffe, die ein hohes oder mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und als kritisch eingestuft sind	Phosphat
Rohstoffe, die ein hohes oder mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und als kritisch eingestuft sind	Kobalt, Antimon, Vanadium, Leichte Seltene Erden, Bismut, Germanium, Indium, Wolfram, Niob, Beryllium, Scandium, Gallium, Borate, Schwere Seltene Erden, Palladium, Platin, Rhodium
Massenrohstoffe, die ein hohes oder mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und nicht als kritisch eingestuft sind	Kupfer, Zink, Blei, Aluminium, Quarzsand

Rohstoffe, die ein hohes oder mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und nicht als kritisch eingestuft sind	Molybdän, Nickel, Selen, Silber, Tellur, Rhenium, Gold
Massenrohstoffe, die als kritisch eingestuft sind und kein hohes oder mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen	Flussspat, Baryt
Rohstoffe, die als kritisch eingestuft sind und kein hohes oder mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen	Grafit, Tantal, Magnesium, Naturkautschuk, Platingruppenmetalle, Phosphor, Hafnium, Silizium
Massenrohstoffe, die kein hohes und kein mittleres bis hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und nicht als kritisch eingestuft sind	Kalialz, Tone (wie Kaolin und Bentonit), Schwefel, Kalkstein, Bausand, Kies, Zement ¹⁰

Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 12 zeigt grob die Verflechtung zwischen Materialien/Rohstoffen, Nachfragesektoren und Bedürfnisfeldern.

Abbildung 12: Materialgruppen und Beispielmaterien und deren Verwendung in Nachfragesektoren und Bedürfnisfeldern, rote Pfeile zeigen die Verwendung der Beispielmaterien in roter Schrift



Quelle: eigene Darstellung nach Buchert et al. (2017)

¹⁰ Bausand, Kies und Zement werden in hohen Mengen nachgefragt. Insbesondere Zement verursacht einen relativ hohen Anteil an industriellen Treibhausgasemissionen.

3.2.4 Baukasten für die Modellierung – Sektoren, Produkte, Materialien

Die Sektor-, Produkt- und Materialperspektive wird zu einem Baukasten für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen zusammengeführt (Tabelle 6). Die Angaben zu den wichtigsten Produkten und Materialien wurden zusammengestellt und den relevanten Nachfragesektoren gemäß Kapitel 3.2.1.3 zugeordnet. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich zum Teil um Schätzungen, z. B. von Industrieverbänden, oder um die Angaben der weltweiten Verwendung bzw. der Verwendung in der EU handelt. Quantitative Angaben sind für Deutschland nicht in allen Fällen möglich.

Der Baukasten wurde erstellt, um die wesentlichen Produkte, Anwendungen und Materialien hervorzuheben und sie bei der Modellierung in den jeweiligen Sektoren zu berücksichtigen.

Tabelle 6: Baukasten für die Modellierung – Sektoren, Produkte, Materialien

Sektoren	Produkte/ Anwendungen	Materialien/ Rohstoffe (Auswahl)
Verpackungen	Kunststoffe, Glas, Weißblech, Papier, Pappe, Karton	Erdöl, Erdgas, Eisen, Aluminium (ca. 260.000 t/a), Zinn, Holz, Tone, Sand, Quarzsand, Feldspat, Kalkstein, Borate, Bentonite, Selen, Kaolin, Lithium, Magnesium, Mangan
Batterien	Siehe andere Sektoren	Blei, Nickel, Lithium, Kobalt, Antimon, Indium, Mangan, Graphit, Silber, Zinn, Zink, REE (Praseodym, Neodym, Dysprosium und Samarium)
IKT, Haushaltsgeräte & Beleuchtung	Kabel, Batterien, Kunststoffe, Magnete, TV-Geräte, Telekommunikationsnetze (einschließlich Glasfaser, Laser), Displays, Radiofrequenz-Mikrochips, Rechenzentren, mobile Endgeräte, Geschirrspüler, Waschmaschinen, Kühl- und Gefriergeräte, Heizung, Lüftung und Klimatisierung, LED	Kupfer (ca. 0,6 Mio. t/a), Aluminium (ca. 160.000 t/a), Zinn, Kobalt, Lithium, Indium, Iridium, Gallium, Germanium, Gold, Beryllium, Mangan, Palladium, Tantal, Erdöl, Erdgas, Fluorspat, REE (Neodym), Quarzsand, Wolfram, Gallium, Scandium, Terbium, Wolfram, Silber, Nickel, Cadmium, Ruthenium
Fahrzeuge	Automobile, sonstige Fahrzeuge (v.a. schwere Nutzfahrzeuge), Batterien*, Elektrische Traktionsmotoren, Katalysatoren, Gehäuse, Reifen, Kunststoffkomponente, Elektrotechnik, Motor, Getriebe, andere mechanische Bauteile, Edelstahl, Verzinkungen, Glas; Schmieröle, -fette,	Eisen und Stahl (ca. 9 Mio. t/a), Aluminium (ca. 1 Mio. t/a), Kupfer (ca. 100.000 t/a), Chrom, Magnesium, Zink, Zinn, Nickel, Molybdän, Platin, Titan, Antimon, Kobalt, Zinn, Beryllium, Mangan, Selen, Niob, Palladium, Rhenium, Rhodium, Scandium, Tone, Sand, Feldspat, Kalkstein, Lithium, Graphit, Rare Earth Elements (REE), Tantal, Wolfram, Vanadium
Hochbau	Gebäude, Fenster, Elektrotechnik, Beton, Zement, Glas, Keramik, Rohre, Installationen, Kunststoffe, Verzinkungen, Beleuchtung, Metallurgie	Sand, Kies, Gips, Eisen, Stahl, Aluminium, Kupfer, Blei, Chrom, Gallium, Tone, Kalkstein, Quarzsand, Feldspat, Lithium, Bismuth, Mangan, Holz, Erdöl, Graphit
Tiefbau	Asphalt, Beton, Zement, Ingenieurbauwerke, Kunststoffe, (Verkehrsinfrastruktur)	Sand, Quarzsand, Kies, Gips, Kalkstein, Eisen, Stahl, Aluminium, Erdöl
Lebensmittel	Fleisch- und Molkereiprodukte, Verarbeitete Produkte, Getränke, Futtermittel, Düngemittel, Pestizide und andere chemische Hilfsmittel wie beispielsweise Halmverkürzer, Antibiotika, Treibstoffe, Kunststoffe (inkl. Verpackung), hier im Wesentlichen abiotische Rohstoffe, Kühlmittel	Erdgas, Kalisalze, Phosphat, Nitrat (Stickstoff), Kalksteine, Gips, Borate, Bismuth, Erdöl, Molybdän, Nickel, Selen, Bentonite

Textilien	Naturfaser, synthetische Faser und Regeneratfaser, Chemikalien	Erdöl, Erdgas, Baumwolle, Wolle, Leinen, Seide, Silber
Möbel	Kunststoffe, Beschläge, Glas	Holz, Erdöl, Erdgas, Eisen, Aluminium, Chrom, Sand, Quarzsand, Kalkstein, Blei

* in Batterien werden u. a. verarbeitet: 74 % des Bleiverbrauchs (ca. 300.000 t/a) sowie Nickelverbrauch Lithium, Antimon, Indium, Mangan, Graphit, Silber, Zinn

Quelle: eigene Darstellung

3.3 Definition von ökologischen und ökonomischen Kenngrößen für die Modellierung

Die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen in der nächsten Phase des WWF-Vorhabens „Modell Deutschland Circular Economy“ wird die in den folgenden Tabellen definierten ökologischen und ökonomischen Kenngrößen berücksichtigen.

3.3.1 Ökologische Kenngrößen

Tabelle 7: Definition von zu betrachtenden ökologischen Kenngrößen

Umweltkategorie	Beschreibung	Einheit
Treibhausgasemissionen ¹¹	Treibhausgase sind diejenigen gasförmigen Bestandteile in der Atmosphäre, sowohl natürlichen wie anthropogenen Ursprungs, welche thermische Infrarotstrahlung absorbieren und wieder ausstrahlen. Diese Eigenschaft verursacht den Treibhauseffekt. Wasserdampf (H ₂ O), Kohlendioxid (CO ₂), Lachgas (N ₂ O), Methan (CH ₄) und Ozon (O ₃) sind die Haupttreibhausgase in der Erdatmosphäre. Außerdem gibt es eine Vielzahl von ausschließlich vom Menschen produzierten Treibhausgasen in der Atmosphäre, wie die Halogenkohlenwasserstoffe und andere chlor- und bromhaltige Substanzen. In der für die Analyse der Relevanz der Sektoren verwendeten Datenbank EXIOBASE sind folgende THG enthalten: CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, NO _x , SO _x , SF ₆ , HFCs, PFCs. Die jeweils emittierten Mengen werden mithilfe von Umrechnungsfaktoren aus dem 5. Sachstandsbericht des IPCC in CO ₂ -Äquivalente umgerechnet.	kg CO ₂ e/a
Ressourceninanspruchnahme ¹²	Raw Material Consumption (RMC): In der wirtschaftsraumbezogenen Stoffstromrechnung berechnet sich der RMC aus der Gesamtmasse der im Inland gewonnenen Primärrohstoffe sowie der – in Rohstoffäquivalente umgerechneten – importierten Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren abzüglich der – in Rohstoffäquivalente umgerechneten – exportierten Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren. In EXIOBASE wird zwischen über 200 Kategorien von Rohstoffen unterschieden, darunter 12 Metallerze, 8 nicht-metallische Mineralien und 196 Biomassetypen. Fossile Rohstoffe sind aus Lizenzierungsgründen nur als eine aggregierte Kategorie abgebildet.	t/a
Landnutzung	Der Wirkungsindikator Landnutzung beschreibt die Inanspruchnahme (i. S. v. Belegung, engl. occupation und i.S.v. Umwandlung, engl. transformation) von Landflächen durch den Menschen. Viele menschliche Aktivitäten sind auf die Nutzung einer bestimmten Fläche angewiesen. Im Wirkungsindikator Landnutzung werden verschiedenen Arten der Flächennutzung zusammengefasst: Nutzung landwirtschaftlicher Flächen, Nutzung von Bauland, Umwandlung natürlicher Flächen. EXIOBASE unterscheidet bei der Flächennutzung u. a. landwirtschaftliche Fläche, forstwirtschaftliche Fläche, Siedlungs- und Verkehrsfläche.	km ²

Quelle: eigene Darstellung

¹¹ Nach Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/t?tag=Treibhausgas#alphabetisch>; letzter Zugriff am 15.07.2022

¹² Nach Umweltbundesamt (UBA) 2012; <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>; letzter Zugriff am 15.07.2022

3.3.1.1 Klimawandel

Die gewichteten Faktoren (Charakterisierungsfaktoren) der berücksichtigten Treibhausgase sind in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Betrachtete Treibhausgase und entsprechende GWP₁₀₀-Faktoren¹³

Treibhausgas (THG)	Treibhauspotenzial (global warming potential, GWP ₁₀₀)
CO ₂	1
CH ₄	27,9
N ₂ O	273
SF ₆	25.200
HFCs	10.740
PFCs	8.748

Quelle: eigene Darstellung

3.3.1.2 Ressourceninanspruchnahme

Die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen sollte deren Einfluss auf die Inanspruchnahme von Ressourcen abbilden. Zugleich sollte die Modellierung an die im politischen und wissenschaftlichen Kontext diskutierten Ressourcenindikatoren anschlussfähig sein. Hier bietet es sich an, zunächst über Indikatoren der nationalen Ressourceneffizienzstrategie bzw. Nachhaltigkeitsstrategie zu berichten (BMUV 2020):

- **Gesamtrohstoffproduktivität:** Der Indikator ist wie folgt definiert: „Die Gesamtrohstoffproduktivität setzt den Wert aller an die letzte Verwendung abgegebener Güter (in Euro, preisbereinigt) in Relation zur Masse der für die Produktion im In- und Ausland eingesetzten Rohstoffe (in Tonnen). Die letzte Verwendung umfasst dabei sowohl inländischen Konsum und inländische Investitionen als auch den Export“. Die Gesamtrohstoffproduktivität umfasst abiotische und biotische Rohstoffe. Sie dient als produktionsbezogener Indikator für die Rohstoffeffizienz der deutschen Volkswirtschaft“¹⁴.
- **Rohstoffkonsum (RMC/Kopf):** Masse der Rohstoffe, die für die inländische Verwendung (Konsum und Investitionen) benötigt wird (BMUV 2020)

Weiterhin sind Indikatoren zum Sekundärrohstoffeinsatz in der nationalen Ressourceneffizienzstrategie eingeführt worden (BMUV 2020).

- **Direct Effect of Recovery (DERec)/Direkter Materialeinsatz (DMI):** „DERec bildet ab, in welchem Umfang Primärrohstoffe, Halb- und Fertigwaren unter Annahme gleicher Produktionsmuster und Technologien importiert oder inländisch gewonnen werden müssten, wenn keine Verwendung von Sekundärrohstoffen erfolgen würde“.

¹³ Nach IPCC 2021; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf; letzter Zugriff am 18.07.2022

Charakterisierungsfaktoren für HFCs und PFCs wurden basierend auf <https://www.epa.gov/ghgreporting/fluorinated-greenhouse-gas-emissions-and-supplies-reported-ghgrp#production> berechnet.

¹⁴ Nach Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-gesamtrohstoffproduktivitaet#welche-bedeutung-hat-der-indikator>; letzter Zugriff am 15.07.2022

- **Direct and Indirect Effects of Recovery (DIERec)/RMI:** „DIERec bildet ab, in welchem Umfang Primärrohstoffe unter Annahme gleicher Produktionsmuster und Technologien global gewonnen werden müssten, wenn keine Verwertung von Sekundärrohstoffen erfolgen würde“.

Die in der nationalen Ressourceneffizienzstrategie verwendeten Indikatoren sollten grundsätzlich auch für die Berichterstattung aus dem Projekt genutzt werden, um die Anschlussfähigkeit sicherzustellen. Allerdings sollten eine Reihe von Problemen bei der Indikatorik bedacht werden. Fortschritte bei den Indikatoren, z. B. Gesamtrohstoffproduktivität und Rohstoffkonsum, lassen keine Rückschlüsse auf die Reduktion des absoluten Material- und Ressourcenverbrauchs der deutschen Volkswirtschaft zu und haben somit wenig Aussagekraft über die Umweltauswirkungen des Konsums und der Investitionen in Deutschland. Die Fortschritte bei diesen Indikatoren werden maßgeblich durch die Faktoren wie Wachstum des BIP und Einwohnerzahl verursacht. Was die Anwendbarkeit von DIERec und DERec angeht, sind die Zeitreihen nur für Teilbereiche verfügbar.

In der wissenschaftlichen Diskussion werden neben den oben genannten Indikatoren auch solche Indikatoren verwendet, die auch ungenutzte Entnahmen betrachten, so zum Beispiel Total Material Requirement (TMR). Aus Umweltsicht macht es keinen Unterschied, ob Ressourcen zur Weiterverarbeitung oder als Abraum entnommen werden (EEA 2000).

- **Total Material Requirement (TMR):** Auch als gesamter Materialaufwand bezeichnet. „In der wirtschaftsraumbezogenen Stoffstromrechnung erfasst der TMR alle Materialflüsse aus verwerteter und nicht verwerteter Entnahme im Inland sowie alle im Ausland anfallenden Materialflüsse aus verwerteter und nicht verwerteter Entnahme, die durch Importe verursacht werden“¹⁵.

Problematisiert wird der Indikator aber aufgrund der Schwierigkeiten der Erhebung und der statistisch genauen Abgrenzung ungenutzter Materialien (z. B. Mostert und Bringezu 2019). Die Probleme sind besonders bei biotischen Materialien virulent, da hier schwer entscheidbar ist, welche Materialien ungenutzte Entnahmen sind. Daher liegt der Fokus in der wissenschaftlichen Diskussion auf abiotischen Materialien.

Fazit Ressourceninanspruchnahme

Bei der Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen zur ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzung sollte der Fokus zunächst auf den Rohstoffkonsum (einschließlich der international verursachten Rohstoffnutzung) gelegt werden. Dabei sollten alle Materialströme berücksichtigt werden, einschließlich der Materialflüsse, die in der nationalen Ressourceneffizienzstrategie nicht weiter adressiert werden (z. B. Energierohstoffe, Lebensmittel). Damit wird vermieden, dass Problemverschiebungen übersehen werden.

Die Daten zum Rohstoffverbrauch Deutschlands sollten weiterhin mit den Daten zu ungenutzten Entnahmen abgeglichen werden. Es gibt Hinweise darauf, dass die ungenutzten Entnahmen global stärker anwachsen als der Rohstoffkonsum (z. B. Mudd 2010). Dies liegt daran, dass wachsende Nachfrage und neue Extraktionstechnologien die Erschließung von bisher unzugänglichen Vorkommen oder von Vorkommen aus niedrigen Konzentrationen technisch möglich und wirtschaftlich interessant machen und damit ein höherer Materialumsatz verbunden ist.

Weiterhin sollte die Indikatorik auch im Hinblick auf Ziele diskutiert werden, die mit den jeweiligen Indikatoren sinnvoll zu verbinden sind. Bisherige Fortschritte bei dem Effizienzziel der Bundesregierung gehen auf die Verbesserung der Wirtschaftsleistung zurück, nicht auf eine Reduktion des Materialeinsatzes. Es gibt zwar bisher keine politisch beschlossenen Ziele, aber Vorschläge für eine begründete Herleitung, zumindest für abiotische Materialien (z. B. Bringezu und Schütz 2014; Hirschnitz-Garbers und Werland 2017; Buchert et al. 2017). Diese bilden eine gute Grundlage für

¹⁵ Nach Umweltbundesamt (UBA) 2012.

die Definition und Herleitung von absoluten Reduktionszielen in der Modellierungsphase, z. B. 80 % Reduktion des $TMC_{abiotisch}$ oder $RMC_{abiotisch}$ bis 2045 (Basisjahr 2010) o. Ä. Für biotische Materialien gibt es derzeit noch keine vergleichbaren Vorschläge, allenfalls solche, die sich auf die für die Produktion erforderliche Landnutzung beziehen (z.B. Umweltbundesamt (UBA) 2013). Hier könnten sich in der nahen Zukunft mit der von der Bundesregierung angestrebten Biomassestrategie neue Impulse ergeben. In jedem Fall sollte der Stand der Forschung und der Debatte in der Modellierungsphase aufgearbeitet werden.

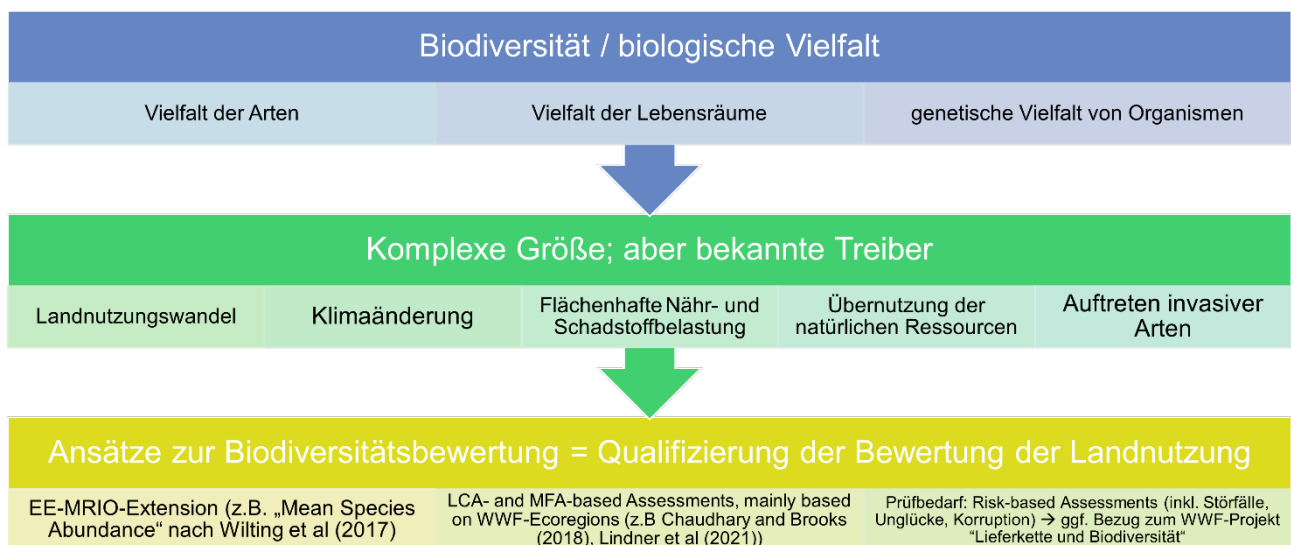
Schließlich sollten weitere Daten zur Nutzung von Sekundärrohstoffen über die in der Ressourceneffizienzstrategie der Bundesregierung hinausgehenden Indikatoren geprüft werden. Diese sollten daher durch die in EXIOBASE enthaltenen Daten zu Sekundärrohstoffen und durch die bei der Betrachtung der Einzelmaßnahmen erhobenen Daten ergänzt werden.

3.3.1.3 Biodiversität

Biodiversität bzw. biologische Vielfalt ist eine komplexe Größe, die sich gemäß dem Übereinkommen über die biologische Vielfalt (Convention on Biological Diversity, CBD) über die Vielfalt der Arten, die Vielfalt der Lebensräume und die genetische Vielfalt innerhalb von Organismen definiert (United Nations 1992). Biologische Vielfalt stellt eine der wichtigsten Grundlagen unseres Lebens dar. Andererseits üben wir einen starken – teils fördernden, teils zerstörerischen – Einfluss auf die biologische Vielfalt aus. Schutz und Erhalt der biologischen Vielfalt sind somit zugleich unverzichtbare Grundlage und Schutzgut für die Vision einer Circular Economy.

Aus Sicht des zu entwickelnden Circular Economy-Bewertungsmodells stellen sich in Bezug auf die Modellierung und Quantifizierung eine Reihe von Herausforderungen. Biodiversitätseffekte stehen am Ende einer Kette von Wirkungen verschiedener Parameter, die untereinander in teilweise komplexer Ursache-Wirkungsbeziehung stehen. Bei Biodiversitätsveränderungen handelt es sich daher i. d. R. um indirekte Effekte, die auch als sekundäre bzw. tertiäre Effekte bezeichnet werden können.

Abbildung 13: Darstellung zum Vorgehen bei der Abschätzung von Biodiversitätseffekten



Quelle: eigene Darstellung

Wie in Abbildung dargestellt sieht das Vorgehen bei der Abschätzung von Biodiversitätseffekten die Kombination von drei unterschiedlichen Betrachtungsebenen und damit jeweils verbundenen Bewertungsansätzen vor. Auf Ebene des in der Hauptstudie genutzten EE-MRIO-Modells in EXIOBASE wird dabei in einem Top-Down-Ansatz eine Erweiterung (engl. Extension) auf der Basis der Bewertung der „Mean Species Abundance“ nach Wiltling et al (2017) erarbeitet (siehe ausführliche Beschreibung des Vorgehens in Abschnitt 3.6). Um möglichen Herausforderungen und/oder Ungenauigkeiten gezielt begegnen zu können, werden auch zwei Bottom-up-Ansätze verfolgt, wie ebenfalls in Abbildung dargestellt. Somit ist es möglich, Produktsysteme (z. B. ausgewählte Referenzprodukte) und Wertschöpfungsketten, die als besonders relevant eingestuft werden, genauer im Hinblick auf die Biodiversitätseffekte entlang der jeweiligen Produktlebenszyklen zu betrachten.

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Die produktbezogene Betrachtung biodiversitätsrelevanter Aspekte im Zusammenhang mit ausgewählten Referenzprodukten bzw. deren Anwendungsbereichen (z. B. Batterierohstoffe, Textilfasern) stellt somit eine Ergänzung der Betrachtung im Zuge der Berechnung der Mean Species Abundance mit EXIOBASE dar. Sie soll insbesondere dort zum Einsatz kommen, wo besonders große Biodiversitätsaspekte erwartet werden können. Darüber hinaus ist die gezielte Untersuchung ausgewählter Produkte und Materialströme ein weiterer Anwendungsfall, bei dem aus der sektorspezifischen Expertise zu erwarten ist, dass relevante Bezüge zur Biodiversität bestehen, diese jedoch der gängigen Bewertungslogik der EE-MRIO folgend möglicherweise nicht mit höchster Priorität bewertet würden – und daher ggf. unberücksichtigt bleiben würden.

Für die Bewertung von Biodiversitätsaspekten im Rahmen produktlebenszyklusbezogener Betrachtungen wurden eine Reihe unterschiedlicher Ansätze vorgeschlagen. Die meisten dieser Ansätze verbindet, dass der Impact auf die Biodiversität durch eine Verrechnung von Charakterisierungsfaktoren mit den bedingt durch einen (Produktions-)Prozess benötigten und beeinträchtigten Flächen sowie mit der Nutzungsdauer dieser Flächen bestimmt wird (Lindner et al. 2019). Im Zuge der Hauptseite wird das von Lindner et al. (2019) vorgeschlagene Vorgehen zur Abschätzung produktbezogener Biodiversitätsaspekte angewandt. Dies erlaubt auch eine grundsätzliche Anschlussfähigkeit an parallel beim WWF laufende oder kürzlich abgeschlossene Studien (z. B. Ermittlung von Biodiversitätsfußabdrücken für Lebensmittel (WWF Deutschland 2022).

Aus verschiedenen Kontexten, z. B. Textilien und abiotische Rohstoffe, können bestehende wissenschaftliche Arbeiten und Expertenerfahrungen, die das Abschätzen von Effekten in zweiter und dritter Ordnung und Durchführen von Sensitivitätsanalysen ermöglichen, herangezogen werden. Neben den aus dem „Regelbetrieb“ resultierenden Biodiversitätseffekten können insbesondere auch Störfälle, Havarien und Unfälle ein beträchtliches Biodiversitätsgefährdungspotenzial aufweisen. Um auch diese Effekte in die Untersuchung einbeziehen zu können, wird für ausgewählte Produktsysteme, für die entsprechend hohe Gefährdungspotenziale vermutet werden, eine ergänzende Risikoabschätzung vorgenommen. Auch hierzu laufen in parallelen Projekten beim WWF Arbeiten zur Entwicklung von Tools, um Biodiversitätsrisiken entlang ausgewählter Wertschöpfungsketten zukünftig besser abschätzen zu können. Stand der Methodenentwicklung ist es, die bereits aus der oben ausgeführten Produktökobilanzierung bekannten Methodenansätze zu nutzen und gezielt in Hinblick auf Biodiversitätsrisiken zu ergänzen. Es wird erwartet, dass die konkreten methodischen Ansätze zur Abschätzung von Biodiversitätsrisiken entlang der Lieferkette im laufenden 3. und 4. Quartal 2022 entwickelt werden und bis Jahresende 2022 vorliegen. Entsprechend des tatsächlichen Projektfortschritts des parallel laufenden Projektes wird auch in Bezug auf Risk Based Assessments die Möglichkeit einer engen Verzahnung angestrebt.

Fazit Biodiversität

Für die umfängliche Bewertung der komplexen Größe „Biologische Vielfalt“ steht nicht nur ein Ansatz zur Verfügung. Wie bereits skizziert und in Kapitel 3.6 dargestellt, kann die Biodiversitätsbewertung in der Modellierungsphase aus einer Kombination verschiedener Bottom-Up- und Top-Down-Ansätze bestehen. Im Zuge der hier vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden die jeweiligen Ansätze geprüft. Im Ergebnis liegen konkrete Methodenvorschläge und Vorschläge zu deren Kombination vor, sodass eine Bewertung der Biodiversitätsaspekte im Zuge der Modellierungsphase nicht allein über den Hilfsindikator „Landnutzung“ abgebildet werden muss. Das vorgeschlagene Vorgehen bei der Abschätzung von Biodiversitätseffekten wurde im Zuge der Machbarkeitsstudie als grundsätzlich geeignet und umsetzbar eingeschätzt und entsprechend in den Vorschlag für ein Circular Economy-Bewertungsmodell aufgenommen (vgl. Abschnitt 3.6).

3.3.2 Sozio-ökonomische Kenngrößen

Um auch die sozioökonomischen Implikationen der Circular Economy-Maßnahmen analysieren zu können, müssen geeignete Indikatoren ausgewählt werden. Für Deutschland spielt vor allem eine Rolle, wie sich die Maßnahmen auf die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und die damit einhergehende Beschäftigung auswirken. Hierzu kann die sektorale Bruttowertschöpfung als Indikator herangezogen werden. Es ist davon auszugehen, dass einige Branchen ihre Wertschöpfung steigern können, beispielsweise wenn sie im Bereich von Reparaturen oder zirkulären Geschäftsmodellen tätig sind. Im Gegensatz dazu könnten Branchen, die eng mit der Primärrohstoffgewinnung verbunden sind, Einbrüche in der Wertschöpfung verzeichnen. Die Beschäftigung folgt dabei üblicherweise der sektoralen Entwicklung der Wertschöpfung.

Die Circular Economy-Maßnahmen können sich zudem auf die Versorgungssicherheit der deutschen Wirtschaft mit wichtigen Rohstoffen auswirken. Es ist davon auszugehen, dass die Maßnahmen weitestgehend zu einer Reduktion der Nachfrage nach Primärrohstoffen und somit zu einer Entlastung im Vergleich zum Status quo führen, also die Versorgungssicherheit erhöhen. Allerdings müssen bei der Bewertung zum einen widersprüchliche Effekte (z. B. kann erhöhte Materialeffizienz zu geringerer Recyclingfähigkeit führen) und zum anderen kurz- und langfristige Effekte (Bsp. Zeitverzug zwischen Effekten auf Materialbedarf und Recyclingpotenzial) vorsichtig abgewogen werden. Dabei ist außerdem wie oben beschrieben zu beachten, dass sich Rohstoffbedarfe auch unabhängig von Circular Economy-Maßnahmen verändern können, beispielsweise in Form technologischer Entwicklungen. Ein geeigneter Indikator für die Versorgungssicherheit ist daher die Reduktion des Rohstoffbedarfs gegenüber der heutigen Situation in Kombination mit qualitativen Einschätzungen zur Gesamtentwicklung des jeweiligen Rohstoffmarktes und zugehöriger Risikofaktoren und Technologien.

Tabelle 9: Definition von zu betrachtenden sozio-ökonomischen Kenngrößen

Bewertungskriterium	Beschreibung	Indikatoren/ Einheit
Bruttowertschöpfung ¹⁶	Die Bruttowertschöpfung ist ein Indikator, der den Wert der im Produktionsprozess erzeugten Waren und Dienstleistungen einer Volkswirtschaft abbildet. Die Bruttowertschöpfung wird zu Herstellungspreisen bewertet, das heißt ohne die auf die Güter zu zahlenden Steuern (Gütersteuern), aber einschließlich der empfangenen Gütersubventionen	Millionen €/a

¹⁶ Statistisches Bundesamt: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Glossar/bruttowertschoepfung.html>; letzter Zugriff am 15.07.2022

Bewertungskriterium	Beschreibung	Indikatoren/ Einheit
	Im Zuge der Circular Economy-Maßnahmen ist von Veränderungen in der Wertschöpfung einiger Sektoren auszugehen. Beispielsweise kann es zu einer Reduktion der Wertschöpfung im Bereich der Primärrohstoffgewinnung kommen, während Reparaturdienstleistungen ggfs. ihre Wertschöpfung steigern können. Die sektoralen Veränderungen ergeben einen Gesamteffekt, der je nach Ausgestaltung der Circular Economy-Maßnahmen und ihren direkten und indirekten Wirkungen positiv oder negativ sein kann.	
Beschäftigung	Der Indikator gibt an, wie viele Menschen direkt in der jeweiligen Branche beschäftigt sind. Ähnlich zur Wertschöpfung können die Circular Economy-Maßnahmen zu Veränderungen in der Beschäftigung, sowohl sektoral als auch insgesamt, führen.	1000 Personen in Vollzeitäquivalenten
Versorgungssicherheit	Die Sicherheit der Versorgung Deutschlands mit benötigten Rohstoffen wird aus der Kombination von wirtschaftlicher Bedeutung und der Wahrscheinlichkeit von Versorgungsengpässen für jeden Rohstoff individuell ermittelt. Circular Economy-Maßnahmen können sich bspw. durch Reduktion oder Verschiebung des Bedarfs oder auch Schaffung von heimischem Angebot durch Recycling auf die Versorgungssicherheit auswirken.	Reduktion des Rohstoffbedarfs gegenüber heute in Prozent in Kombination mit qualitativen Einschätzungen zur Entwicklung des jeweiligen Rohstoffmarktes und zugehöriger Risikofaktoren und Technologien

Quelle: eigene Darstellung

3.4 Wichtigste sektorspezifische Circular Economy-Maßnahmen

Im Folgenden wird die Bewertung von wichtigen Circular Economy-Maßnahmen in den ausgewählten Schlüsselsektoren dargestellt. Die Liste der Circular Economy-Maßnahmen ist nicht erschöpfend. Sie bietet allerdings gute Anhaltspunkte für die Einschätzung des Aufwandes und der Komplexität für die Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen.

Es wird empfohlen, die hier bewerteten Circular Economy-Maßnahmen in der Modellierungsphase mithilfe von Sektorexpert*innen zu validieren, ggf. zu ergänzen und zu konsolidieren. Um den Aufwand der Modellierung von Circular Economy-Maßnahmen in einem plausiblen Rahmen zu halten, sollte die Gesamtanzahl der Maßnahmen allerdings nicht weiter erhöht werden. In der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurden **107 Circular Economy-Maßnahmen in elf Schlüsselsektoren** identifiziert. Das sollte als ein guter Orientierungswert für die Modellierungsphase dienen.

Zur Übersichtlichkeit der Bewertung der Circular Economy-Maßnahmen werden in den folgenden Abschnitten die Ergebnisse nur konsolidiert dargestellt. Dabei geht es um eine Darstellung der Bewertung anhand des Punktesystems (siehe Abschnitt 2.3 für die Methodik) sowie eine Synthese der analysierten Kriterien.

Eine ausführliche Bewertung von einzelnen Circular Economy-Maßnahmen befindet sich in einem separaten Excel-Dokument und ist nicht Gegenstand dieses Berichts. Für die Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen verwendete Literatur befindet sich in Anhang III.

An dieser Stelle ist es wichtig zusätzlich zu erwähnen, dass die Bewertung der Maßnahmen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Die Bewertung spiegelt vielmehr die Einschätzung des Projektteams im Hinblick auf mögliche Bedenken, Lücken und Potenziale wider, die bei der Modellierung der Maßnahmen auftreten können. Die Beurteilung ist in vielen Fällen subjektiv und basiert entweder auf vorhandener Literatur, Informationen oder eigenen Erfahrungen in den jeweiligen Bereichen. Theoretisch ist es möglich, zu einer anderen Beurteilung der Maßnahmen zu kommen, wenn diese von anderen Expert*innen bewertet wurden. Insgesamt bedarf es einem Zusammenspiel der einzelnen Maßnahmen in den jeweiligen Sektoren, um die Ziele einer Circular Economy zu erreichen.

3.4.1 Verpackungen

Bei Verpackungen wurden elf Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen ist in Tabelle 10 enthalten. Die Bewertungsergebnisse werden in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgelistet.

3.4.1.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 10: Verpackungen: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Reduktion von Verpackungen durch Mehrweg	Mehrweg wird in Deutschland seit Jahren im Bereich von Getränkeverpackungen eingesetzt. Der Anteil an Mehrweg (Glas und Kunststoff) gegenüber Einweg (v.a. Kunststoff) geht, mit Ausnahme des Segments Bier, seit Jahren stark zurück. Der Anteil von ökologisch vorteilhaften Mehrweglösungen soll im Getränkebereich gesteigert werden und darüber hinaus auf andere Lebensmittelbereiche ausgedehnt werden. Beispielsweise werden Molkereiprodukte, Brotaufstriche, Take-away Becher und Geschirr, Versandboxen u. Ä. derzeit bereits im Mehrweg angeboten. Eine massive Ausweitung wäre technisch möglich. Darüber hinaus soll durch vermehrte Nutzung von Mehrwegpoolbehältnissen und deren Optimierung, z. B. durch Reduktion der Einweganteile wie Deckel u. Ä., die Materialeffizienz der Mehrwegsyste me gesteigert und deren Umweltauswirkungen reduziert werden.
2	Reduktion von Verpackungen durch Weglassen	Verkauf unverpackter Lebensmittel in speziellen Unverpacktläden und vermehrt in Bioläden und im "normalen" Einzelhandel (Vollsortimenter) spart Verpackungen für so angebotene Produkte ganz ein. Hierzu werden für Flüssigkeiten und Pasten wie Getränke, Seifen, Shampoo, Reinigungsmittel u. Ä. diverse Abfüllstationen genutzt. Stückige trockene Ware wie Obst, Gemüse, Kaffeebohnen, Teigwaren u. Ä. werden bereitgestellt und in eigenen Behältnissen oder Beutel abgefüllt. Auch Fleischwaren und Käse an Frischetheken werden vermehrt in Behältnisse der Kunden oder in Mehrwegboxen abgefüllt. Eine Ausdehnung auf weitere Produkte und insbesondere die vermehrte Anwendung bei Vollsortimentern ist notwendig, um relevante Mengen an Verpackungsmaterialien einzusparen. Eine Kombination mit Mehrwegsyste men kann dadurch erfolgen, dass die Abfüllung der unverpackten Produkte in Pfandbehältnissen erfolgt.
3	Reduktion von Verpackungen durch verändertes Design der verpackten Produkte	Wenn anstelle von gebrauchsfertigen Flüssigkeiten oder Pasten Konzentrate, Pulver, Tabletten oder stückige Formen dieser Produkte verkauft werden, die vom Nutzer verdünnt, angerührt oder auf andere Art genutzt werden, wie beispielsweise Seifenstücke statt Flüssigseife oder Waschpulver statt Flüssigwaschmittel, werden Verpackungen eingespart.

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
4	Reduktion von Verpackungen durch Materialeinsparungen	Durch die Reduktion von Wanddicken oder durch die Optimierung der Form der Verpackungen kann Verpackungsmaterial eingespart werden. Weitere Reduktionen wären dadurch möglich, dass Komfortbestandteile von Verpackungen, wie Sprühpistolen bei Reinigungsmitteln u. Ä. extra angeboten und mehrfach benutzt werden und der Trend zu kleineren Portionsverpackungen reduziert wird.
5	Materialsstitution	Durch die Substitution von ökologisch schlecht geeigneten Verpackungsmaterialien, z. B. von Kunststoffen wegen der Meeresvermüllung oder Glas wegen der hohen spezifischen Verpackungsgewichte, durch weniger umweltbelastende und leichtere Materialien, z. B. Papier, Metall oder für bestimmte Anwendungen auch gut recyclingfähige Kunststoffe, sollen die Umweltauswirkungen von Verpackungen reduziert werden.
6	Biogene Verpackungen	Der Verbrauch fossiler Rohstoffe soll durch den Einsatz von regenerativen Rohstoffen, z. B. Papier oder Kunststoffe auf Pflanzenbasis, wo sinnvoll, ersetzt werden. Dadurch werden zusätzlich die CO ₂ -Emissionen aus der Entsorgung fossiler Verpackungsabfälle reduziert.
7	Steigerung von Sortier- und Recyclingeffizienzen	Heute führen die Marktbedingungen im Verpackungsrecycling dazu, dass Sortierbetriebe die Anlagen bei zu hohen Durchsätzen betreiben, wodurch die Qualität und Quantität der Wertstofffraktionen leiden. Verpackungsabfälle, deren Recycling teurer als deren energetische Verwertung ist, wie beispielsweise bestimmte PO-Folienfraktionen, werden häufig nicht recycelt. Um dies zu vermeiden, soll die Sortier- und Recycling-Infrastruktur auf den erforderlichen Umfang ausgebaut und effektiv betrieben werden.
8	Optimierung der Getrennsammlung von Verpackungsabfällen und stoffgleichen Nichtverpackungen	Nach wie vor werden noch erhebliche Mengen an Wertstoffen über die Restmülltonne entsorgt und gehen dadurch dem Recycling verloren. Die hier genannte Circular Economy-Maßnahme soll diese Potenziale heben und zusätzlich bundesweit die stoffgleichen Nichtverpackungen erfassen.
9	Design-for-Recycling	Verpackungen werden vermehrt so gestaltet, dass sie in den Sortieranlagen gut erkannt und aussortiert werden können und in einem mechanischen, werkstofflichen Recyclingverfahren effizient zu hochwertigen Sekundärrohstoffen recycelt werden können. Dies geschieht z. B. durch die Reduktion und Harmonisierung der verwendeten Materialien und den Verzicht auf störende Etiketten, Farben und Klebstoffe.
10	Verbesserung der Qualität des Rezyklats	Durch Verbesserung der Rezyklat-Qualitäten soll die Rückführung der Sekundärrohstoffe auch in die gleichen (Closed Loop-) oder gleichwertigen ("quasi" Closed Loop-) Anwendungen in zu den Ausgangsprodukten ähnlichen Produkten ermöglicht werden. Der Fokus sollte auf Post-Consumer-Abfälle, bestenfalls aus der haushaltsnahen Erfassung, liegen.
11	Chemisches Recycling	Um Rückstände aus den Sortieranlagen, Aufbereitungs- und Recyclingprozessen, die auch nach Optimierung der Verpackungen und Verwertungsprozesse mechanisch, werkstofflich nicht (hochwertig) recycelt werden können, noch einer Nutzung zuzuführen und deren klimaschädliche Verbrennung zu vermeiden, wird durch (hydro-)chemische Verfahren ein Rohstoff für die Kunststoffproduktion hergestellt.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.1.2 Bewertung

Abbildung 14: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Verpackungen

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher *innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Reduktion von Verpackungen durch Mehrweg	3	2	2	2	3	2	3	2
2	Reduktion von Verpackungen durch Weglassen	3	2	2	2	3	2	3	2
3	Reduktion von Verpackungen durch verändertes Design der Produkte	3	2	2	3	3	2	2	2
4	Reduktion von Verpackungen durch Materialeinsparungen	2	3	2	3	2	3	3	3
5	Materialsubstitution	1	3	2	2	3	2	3	3
6	Biogene Verpackungen	1	3	2	1	2	2	3	3
7	Steigerung von Sortier- und Recyclingeffizienzen	1	3	2	3	3	3	3	3
8	Optimierung der Getrennt-sammlung von Verpackungs-abfällen u. stoffgleichen Nichtverpackungen	2	3	2	3	2	3	3	3
9	Design-for-Recycling	3	3	2	3	2	2	3	3
10	Verbesserung der Qualität des Rezyklats	2	3	2	3	2	2	3	3
11	Chemisches Recycling	2	3	2	1	1	1	1	3

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.1.3 Synthese

Die Maßnahmen mit dem höchsten **Einsparpotenzial an Treibhausgasemissionen** im Verpackungssektor sind die Maßnahmen, die auf eine Reduzierung der Verpackung abzielen. Durch ein Umstellen auf mehr Mehrwegverpackung, das Weglassen von vermeidbaren Verpackungen und die Reduktion der Verpackung durch verändertes Produktdesign kommt es insgesamt zu einer reduzierten Produktion von Verpackungen, was sich positiv auf die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen auswirkt. Die drei Maßnahmen lassen sich sehr gut kombiniert anwenden. Ein ähnlich hohes Einsparpotenzial hat die Maßnahme, welche ein recyclingfähiges Verpackungsdesign fördert, welches von den Sortieranlagen leichter erkannt und sortiert werden kann und somit zu höheren Recyclingquoten führt.

Ein moderates Einsparpotenzial haben die Maßnahmen Optimierung der Mülltrennung und Reduktion von Verpackungen durch Materialeinsparungen. Durch eine optimierte Mülltrennung soll dem Recyclingstrom mehr Wertstoffe zugeführt werden. Auch moderate Einsparpotenziale werden für die Maßnahmen, welche sich auf ein verbessertes Recycling konzentrieren, erwartet. Durch eine Verbesserung der Qualität des Rezyklats soll ein höherer Anteil an hochwertiger werkstofflicher Ver-

wertung von Verpackungsmaterial ermöglicht werden. Eine „hochwertige werkstoffliche Verwertung“ ist gemäß dem Mindeststandard der Zentralen Stelle Verpackungsregister¹⁷ die „grundsätzliche und graduelle Eignung einer Verpackung, nach Durchlaufen industriell verfügbarer Rückgewinnungsprozesse, Neuware in werkstofftypischen Anwendungen zu substituieren“. Durch eine Förderung des chemischen Recyclings sollen Kunststoffreststoffe, welche momentan noch nicht dem mechanischen Recycling zugeführt werden können, über den Umweg des Ersatzes von Naphta als Rohstoff dennoch recycelt werden.

Eher geringere Einsparpotenziale an Treibhausgasemissionen werden für die Maßnahmen einer Materials substituierung und hinsichtlich des Ausbaus von Sortieranlagen gesehen. Die Einsparpotenziale einer Materials substitution durch Papier-, Metall- oder auch biogene Kunststoffverpackungen werden als gering betrachtet. Eine Materials substitution fossiler Kunststoffverpackungen durch biogene Kunststoffverpackungen führt nicht zu einer Reduktion der verwendeten Verpackungsmenge.

Zielkonflikte gibt es bei der Substitution von fossilen Kunststoffen mit biogenen Kunststoffen. Die Vorteile biogener Kunststoffe bezüglich der Treibhausgasemissionen werden in der Regel aber durch Nachteile in anderen Wirkungskategorien, wie zum Beispiel dem Flächenverbrauch und der Biodiversität, aufgezehrt.

Das chemische Recycling kann als Konkurrenz zum – ökologisch in den allermeisten Fällen – günstigeren mechanischen, werkstofflichem Recycling eingesetzt werden. Ein weiteres Problem des chemischen Recyclings ist, dass es **technologisch** noch nicht ausgereift ist. Die Funktionalität der gesamten Technikkette, vom Abfall zum neuen Kunststoff, ist nicht erprobt und vermutlich nur bei ausgewählten Kunststoffen und Kunststoffmischungen gegeben.

Die **Datenlage** zu Produktion und Verwertung von Verpackungen insgesamt ist gut bis sehr gut. Qualifizierte Daten mit Aufteilung der Verpackungsmengen und -materialien nach Segmenten sind derzeit öffentlich nicht verfügbar und müssten beschafft werden. Daten zu Vermeidungserfolgen müssen hergeleitet werden. Ökobilanziell nutzbare Daten gibt es in diesem Zusammenhang nur für Mehrweg, hauptsächlich im Getränkebereich. Die Datenlage bei Recycling und Verwertung von Verpackungen ist sehr gut.

Die Maßnahmen mit den höchsten Einsparpotenzialen haben bezüglich der Akzeptanz in weiten Kreisen der Industrie, dem Handel und bei vielen Verbraucher*innen große Zweifel aufkommen lassen und werden zumindest starker monetärer Anreize bedürfen. Die restlichen Maßnahmen sind einfacher umzusetzen. Deren Potenziale sind allerdings überschaubar. Einspart werden können alle Verpackungsmaterialien, hauptsächlich: Papier, Pappe, Karton, Glas, Kunststoffe, Eisen, Zinn, Aluminium.

3.4.2 Batterien

Bei Batterien wurden zehn Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen ist in Tabelle 11 enthalten. Die Bewertungsergebnisse können Abbildung entnommen werden.

¹⁷ Stiftung Zentrale Stelle Verpackungsregister (ZSVR) (2021): Mindeststandard für die Bemessung der Recyclingfähigkeit von systembeteiligungspflichtigen Verpackungen gemäß § 21 Abs. 3 VerpackG. Download: <https://www.verpackungsregister.org/stiftung-behoerde/mindeststandard-21/ausgabe-2021>

3.4.2.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 11: Batterien: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Sammelquoten erhöhen	Es werden mehr Altbatterien eingesammelt, um diese einer zweiten Nutzung oder dem Recycling zuzuführen
2	Design für Wiederverwendung/Recycling	Design erleichtert die Wiederverwertung bzw. das Recycling. Dadurch werden weniger Primärrohstoffe benötigt.
3	Langlebiges Design	Das Design ermöglicht eine lange Haltbarkeit der Batterien und damit einer verlängerte Nutzungsphase.
4	Wiederverwendung / Repurposing / Remanufacturing	Batterien werden einer weiteren Nutzung zugeführt, dies betrifft hauptsächlich Fahrzeugbatterien. Diese weitere Nutzung kann nach einer Aufbereitung wieder in einem Fahrzeug stattfinden oder/ und anschließend darin bestehen, dass die Batterien als standortgebundener Energiespeicher dienen. Dadurch kann der Bedarf an neuen Batterien sinken.
5	Hochwertiges Recycling mit hohen Effizienzen	Es können hochwertige Sekundärmaterialien gewonnen werden, um diese wieder der Batterieproduktion zuzuführen.
6	Erhöhte Verwendung von recyceltem Material	In der Batterieproduktion werden mehr recycelte Materialien (Metalle, Kunststoffe) eingesetzt.
7	Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung	Die Effizienz in der Produktion wird durch geringeren Produktionsabfall gesteigert. Die Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung verringert die Menge des im Herstellungs- und Fertigungsprozess verwendeten Materialabfalls, wodurch der Bedarf an Materialinput aus dem Fertigungssektor und die Menge an Abfall gesenkt wird.
8	Direktes Recycling von Produktionsabfällen	Produktionsabfälle werden so aufbereitet, dass sie in der Batterieproduktion wiederverwendet werden können, dadurch sinkt der Bedarf an Materialinput.
9	Beschränkung von primären Batterien	Nicht wiederaufladbare Batterien werden weniger hergestellt und verkauft. Es wird angenommen, dass stattdessen mehr sekundäre Batterien genutzt werden.
10	Materialsubstitution	Es werden Materialien der Batteriezellen durch andere Materialien ersetzt.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.2.2 Bewertung

Abbildung 15: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Batterien

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Sammelquoten erhöhen	3	2	2	3	3	2	3	1
2	Design für Wiederverwendung/Recycling	2	2	2	2	2	1	3	2
3	Langlebiges Design	3	2	2	3	2	1	3	2
4	Wiederverwendung/ Repurposing/ Remanufacturing	3	2	2	3	2	1	3	2
5	Hochwertiges Recycling mit hohen Effizienzen	3	2	2	3	2	2	2	3
6	Erhöhte Verwendung von recyceltem Material	3	2	2	3	3	2	3	3
7	Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung	2	3	2	3	2	1	1	3
8	Direktes Recycling von Produktionsabfällen	2	3	2	3	3	3	2	2
9	Beschränkung von primären Batterien	2	1	2	3	3	2	3	3
10	Materialsubstitution	1	2	2	2	2	2	3	2

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.2.3 Synthese

Die Maßnahmen mit dem höchsten **Einsparpotenzial** von Batterien führen zur Produktion von weniger Batterien bzw. zur Verwendung von weniger Primärmaterialien in der Produktion. Eine Reduzierung der Batterieproduktion wird zum Beispiel durch die Weiternutzung von Altbatterien, Nutzung von Altbatterien als Energiespeicher oder die Verlängerung der Lebensdauer von Batterien erreicht. Eine Reduzierung von primärproduzierten Materialien wird durch höhere Recyclingquoten oder die Verwendung von recycelten Materialien in der Produktion erzielt. Diese Maßnahmen werden in dem Vorschlag der Europäischen Kommission zur neuen Batterieverordnung gefordert.

Eine Maßnahme, welche ein Design für eine bessere Wiederverwendung und ein besseres Recycling der Batterie fördert, wird unterstützend zu den genannten Maßnahmen gesehen und hat ein moderates Einsparpotenzial. Mittlere Einsparpotenziale haben die Maßnahmen zum effizienteren Ressourcenmanagement in der Produktion bzw. zur Beschränkung der primären Batterien. Da ein effizienteres Ressourcenmanagement in der Produktion im eigenen Interesse der Unternehmen liegt, wird angenommen, dass ein Großteil der Einsparpotenziale bereits ausgeschöpft ist.

Ein eher geringeres Einsparpotenzial wird für die Materialsubstitution in der Produktion gesehen. Die Materialsubstitution in der Produktion wird normalerweise aufgrund von kostengünstigeren Materialien durchgeführt. Dies kann sich negativ auf die Lebensdauer der Batterien auswirken, was wiederum zu einer erhöhten Produktion von Batterien führt.

Die **Datenlage** zur Produktion von Batterien besteht vor allem aus Schätzungen von verschiedenen Seiten. Aufgrund der Überarbeitung der Batterieverordnung sind die relevanten Daten dazu zwar

vorhanden, aber nur aggregiert auf europäischem Niveau. Die in der Batterieverordnung verwendeten Daten bestehen wiederum aus Abschätzungen. Präzise Daten für den Batteriesektor sind schwierig zu erhalten. Datenquellen für ein langlebigeres Design oder eine höhere Wiederverwendung sind unbekannt.

Viele der Maßnahmen sind nur mit entsprechenden Investitionen, monetären Anreizen und Änderungen der Gesetzesgrundlagen realistisch. Eine Beschränkung von primären Batterien würde bei den Herstellern zu Einnahmeeinbußen führen.

Die **marktstrukturellen Voraussetzungen**, um die Sammelquoten zu erhöhen, sind noch nicht gegeben. Es ist sehr schwer, die nötigen Mengen tatsächlich aufzubringen. Selbst ein Pfand für Batterien würde erst im Nachhinein wirken.

3.4.3 IKT

Bei IKT wurden acht Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen ist in Tabelle 12 enthalten. Die Bewertungsergebnisse sind in Abbildung aufgeführt.

3.4.3.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 12: IKT: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Langlebiges Design	Durch die Auswahl von qualitativ hochwertigen Bauteilen und Materialien sowie die Durchführung von umfassenden Lebensdauerprüfungen zur Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeiten wird die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Geräte erhöht.
2	Product-as-a-Service: Nutzungsdauerverlängerung durch die Mietmodelle	Hersteller verkaufen nicht die Geräte, sondern bleiben ihre Eigentümer. Somit besteht für sie der Anreiz, Geräte langlebig zu gestalten. Entsprechend bieten sie einen Maintenance-Service an, damit die Dienstleistung vollumfänglich erreicht werden kann. Hier geht es konkret um ein monatliches Abonnement durch die Kunde*innen für die uneingeschränkte Nutzung für eine im Vertrag vordefinierte Zeit.
3	Product-as-a-Service: Nutzungsintensivierung durch Sharing-Modelle	Nutzungsintensivierung liegt das Konzept zugrunde, dass Geräte von mehreren Haushalten/Büros geteilt werden. Hersteller verkaufen nicht die Geräte, sondern Dienstleistungen (z. B. Anzahl Kopien, Druckseiten usw.). Die hohe Nutzungsintensität führt dazu, dass Geräte langlebiger gestaltet werden müssen, damit sie nicht bereits nach kurzer Zeit ausfallen.
4	Vermehrte Nutzung von wiederaufbereiteten und Second-Hand-Geräten	Geräte werden nach der Erstinutzung weitergegeben und zumindest in eine Zweitnutzung überführt.
5	Erfolgreiche Reparaturen an Endgeräten nehmen zu	Verbraucher*innen lassen mehr Geräte reparieren und verlängern damit die Nutzungsdauer.
6	Remanufacturing	Das Remanufacturing bezieht sich auf die (Wieder-)Verwendung von Komponenten für die Herstellung neuwertiger Produkte.

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
7	Erhöhte Verwendung von recyceltem Material	Die Maßnahme bezieht sich auf die Rückgewinnung von Sekundärmaterialien für den Einsatz bei der Herstellung neuer Produkte.
8	Ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren	Durch die Konsolidierung und Virtualisierung der IT-Infrastruktur sowie durch die Vermeidung der Überdimensionierung bei Gebäudeinfrastruktur wie z. B. Kühlung lassen sich neben Energie auch Materialien einsparen.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.3.2 Bewertung

Abbildung 16: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei IKT

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nahmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Langlebiges Design	3	2	3	2	3	3	3	1
2	Product-as-a-Service: Nutzungs-dauerverlängerung durch die Mietmodelle	3	1	1	2	3	2	3	1
3	Product-as-a-Service: Nutzungs-intensivierung, durch Sharing-Modelle	1	1	1	1	1	1	3	1
4	Vermehrte Nutz. von wiederaufbereiteten und Second-Hand-Geräten	3	2	3	3	2	1	3	2
5	Erfolgreiche Reparaturen an Endgeräten nehmen zu	3	1	2	3	3	2	3	2
6	Remanufacturing	2	2	3	1	2	2	2	1
7	Erhöhte Verwendung von recyceltem Material	2	1	3	2	3	2	2	2
8	Ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren	2	3	2	1	2	2	3	3

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.3.3 Synthese

Eine Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer von IKT-Geräten hat das größte **Umweltentlastungspotenzial**, denn die Herstellungsphase der IKT-Geräte hat den größten Anteil an lebenszyklusbezogenen Umweltauswirkungen. Insofern sind Maßnahmen wie ein langlebiges Design, die Umsetzung von Mietmodellen und die Förderung von Wiederaufbereitungs- und Reparaturmaßnahmen besonders relevant. Maßnahmen zum Remanufacturing und Recycling sind ebenfalls wichtig, sind aber vom Umweltentlastungspotenzial her geringer einzustufen.

Leider sind **die marktstrukturellen Voraussetzungen** für die Umsetzung von Maßnahmen mit besonders hohem Umweltentlastungspotenzial oft schlecht. Dies ist vor allem auf den großen Anteil der günstigen Neugeräte auf dem Markt zurückzuführen. Dadurch fehlen ökonomische Anreizmechanismen, um lebens- und nutzungsdauerverlängernde Maßnahmen sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Nutzungsphase umzusetzen. Die positive Wirkung von Maßnahmen wie

langlebiges und reparaturfreundliches Design, Mietmodelle und Wiederaufbereitung für eine Second-Hand-Nutzung kann nur bei qualitativ hochwertigen und hochpreisigen Geräten erreicht werden.

Lange Lebens- und Nutzungsdauer von Produkten verursachen in der Produktentwicklung **höhere Kosten**. Auch die Umsetzung von Mietmodellen verursacht in den Anfangsphase höhere Kosten. Unternehmen müssen diese Kosten an die Verbraucher*innen weitergeben oder in Mietmodellen komplexe, vertragliche Konstruktionen zur Minimierung der Geschäftsrisiken unterbringen. Dadurch reduziert sich seitens der Verbraucher*innen die Bereitschaft zur Aufnahme solcher Geräte und Modelle. Vor allem scheinen das Potenzial von Mietmodellen unter aktuellen Rahmenbedingungen überschätzt. Sharing-Modelle sind im Bereich IKT eher unrealistisch.

Kosteneinsparungen für Unternehmen lassen sich im Bereich Remanufacturing von Altkomponenten sowie bei der Virtualisierung und Konsolidierung der Rechenzentrumslandschaft realisieren. Eine Besonderheit stellt aktuell der Markt für die wiederaufbereiteten Geräte dar. Es handelt sich um einen Wachstumsmarkt, auf dem gerade viele Start-Ups entstehen, die deutlich größere Investitionen anziehen als in der Vergangenheit.

Die Verbraucher*innen profitieren insgesamt von **geringeren Lebenszykluskosten** von langlebigen, reparaturfreundlichen und wiederaufbereiteten Geräten. Hohe Kaufpreise steigern auch die Wertschätzung an Geräten. Die Bereitschaft der Verbraucher*innen, höhere Preise für langlebige Produkte zu bezahlen, steigt allerdings nicht linear mit der höheren Lebensdauer. Die Spitzenprodukte bleiben im Nischenbereich. Neben hohen Anschaffungskosten wirken hohe Reparaturkosten als Hemmnis für Reparaturen. Günstige Kaufpreise von Neugeräten beschleunigen den Ersatz von Geräten, die theoretisch noch repariert werden könnten. Mietmodelle sind im privaten Endkosument*innenmarkt noch marginal. Hier spielen neben komplexen vertraglichen und ökonomischen Unsicherheiten auch datenschutzrelevante Anliegen eine Rolle, wenn z. B. Nutzer*innendaten zur Umsetzung einer präventiven Maintenance erhoben werden.

Die **Datenverfügbarkeit** bezogen auf die Materialzusammensetzung, Sammel-, Verwertungs- und Recyclingquoten von IKT-Geräten ist gut. Daten zu typischen Reparaturen und Wiederaufbereitungsmaßnahmen von einigen IKT-Geräten sind vorhanden oder können kostenpflichtig oder mithilfe von Reparatur- und Wiederaufbereitungsunternehmen erhoben werden. Schwieriger sind die Daten zur Abschätzung von ökonomischen Auswirkungen von Maßnahmen auf Unternehmensebene. Dafür liegen nur wenige Anhaltspunkte vor, z. B. in Form von Finanzflussmodellen im Bereich Mietmodell oder Produktionskosten bei der Herstellung von Refabrikaten, die zum Zweck der Modellierung ggf. mithilfe von Experteneinschätzungen extrapoliert werden müssen.

3.4.4 Haushaltsgeräte

Bei Haushaltsgeräten wurden sieben Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 13 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen. Die Bewertungsergebnisse finden sich in Abbildung . Die Maßnahmen und deren Bewertung im Bereich Haushaltsgeräte sind zu einem großen Teil mit den relevanten Maßnahmen und deren Bewertung im IKT-Sektor identisch. Wenige Unterschiede ergeben sich bei der Bewertung der Maßnahme zu Sharing-Modellen. Selbst dort kommt es jedoch nicht zu einer grundsätzlich anderen Bewertung im Hinblick auf die Realisierbarkeit.

3.4.4.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 13: Haushaltsgeräte: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Langlebiges Design	Durch die Auswahl von qualitativ hochwertigen Bauteilen und Materialien sowie durch die Durchführung von umfassenden Lebensdauerprüfungen zur Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeiten wird die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit der Geräte erhöht.
2	Product-as-a-Service: Nutzungsdauerverlängerung durch Mietmodelle	Hersteller verkaufen nicht die Geräte, sondern Dienstleistungen (z. B. Anzahl Waschgänge, Trockenvorgänge usw.). Somit besteht für sie der Anreiz, Geräte langlebig zu gestalten. Entsprechend bieten sie einen Maintenance-Service an, damit die Dienstleistung vollumfänglich erreicht werden kann. Hier geht es konkret um ein monatliches Abonnement durch die Kunde*innen für die uneingeschränkte Nutzung für eine im Vertrag vordefinierte Zeit.
3	Product-as-a-Service: Nutzungsintensivierung durch Sharing-Modelle	Nutzungsintensivierung liegt das Konzept zugrunde, dass Geräte von mehreren Haushalten/Büros geteilt werden. Hersteller verkaufen nicht die Geräte, sondern Dienstleistungen (z. B. Anzahl Waschgänge, Trockenvorgänge usw.). Die hohe Nutzungsintensität führt dazu, dass Geräte langlebiger gestaltet werden müssen, damit sie nicht bereits nach kurzer Zeit ausfallen.
4	Vermehrte Nutzung von wiederaufbereiteten Geräten und Second-Hand-Geräten	Geräte werden nach der Erstinutzung weitergegeben und zumindest einer Zweitnutzung zugeführt.
5	Erfolgreiche Reparaturen an Endgeräten nehmen zu	Verbraucher*innen lassen mehr Geräte reparieren und verlängern damit die Nutzungsdauer.
6	Remanufacturing	Das Remanufacturing bezieht sich auf die (Wieder-)Verwendung von Komponenten für die Herstellung neuwertiger Produkte.
7	Erhöhte Verwendung von recyceltem Material	Die Maßnahme bezieht sich auf die Rückgewinnung von Sekundärmaterialien für den Einsatz bei der Herstellung neuer Produkte.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.4.2 Bewertung

Abbildung 17: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Haushaltsgeräten

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Langlebiges Design	3	2	3	2	3	3	3	1
2	Product-as-a-Service: Nutzungsdauerverlängerung durch die Mietmodelle	3	1	3	2	3	2	3	1
3	Product-as-a-Service: Nutzungsintensivierung durch Sharing-Modelle	3	1	3	1	3	2	3	1
4	Vermehrte Nutzung v. wiederaufbereiteten und Second-Hand-Geräten	3	2	3	3	2	1	3	2
5	Erfolgreiche Reparaturen an Endgeräten nehmen zu	3	1	2	3	3	2	3	2
6	Remanufacturing	2	2	3	1	2	2	2	1
7	Erhöhte Verwendung von recyceltem Material	2	1	3	2	3	2	2	2

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.4.3 Synthese

Eine Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer von Haushaltsgeräten hat das größte **Umweltentlastungspotenzial**, denn die Energieeffizienzverbesserungspotenziale in der Nutzungsphase sind bereits zum größten Teil ausgeschöpft. Die Herstellungsphase hat auch einen großen Anteil an lebenszyklusbezogenen Umweltauswirkungen. Insofern sind Maßnahmen wie langlebiges Design, Umsetzung von Mietmodellen und Förderung von Wiederaufbereitungs- und Reparaturmaßnahmen besonders relevant. Maßnahmen zum Remanufacturing und Recycling sind ebenfalls wichtig, ihr Umweltentlastungspotenzial ist jedoch eher als gering einzustufen.

Leider sind die **marktstrukturellen Voraussetzungen** für die Umsetzung von Maßnahmen mit besonders hohem Umweltentlastungspotenzial oft schlecht. Dies ist vor allem auf den großen Anteil der günstigen Neugeräte auf dem Markt zurückzuführen. Dadurch fehlen ökonomische Anreizmechanismen, um lebens- und nutzungsdauerverlängernde Maßnahmen sowohl in der Produktentwicklung als auch in der Nutzungsphase umzusetzen. Die positive Wirkung von Maßnahmen wie langlebiges und reparaturfreundliches Design, Mietmodelle und Wiederaufbereitung für eine Second-Hand-Nutzung kann nur bei qualitativ hochwertigen und hochpreisigen Geräten erreicht werden.

Eine lange Lebens- und Nutzungsdauer von Produkten verursacht in der Produktentwicklung **höhere Kosten**. Auch die Umsetzung von Mietmodellen bewirkt in der Anfangsphase höhere Kosten. Unternehmen müssen diese Kosten an die Verbraucher*innen weitergeben oder in Mietmodellen komplexe vertragliche Konstruktionen zur Minimierung der Geschäftsrisiken unterbringen. Damit sinkt seitens der Verbraucher*innen die Bereitschaft zur Aufnahme von solchen Geräten und Modellen. Vor allem das Potenzial von Mietmodellen scheint unter aktuellen Rahmenbedingungen überschätzt. Das Gleiche gilt für Sharing-Modelle. Kosteneinsparungen für Unternehmen lassen sich im Bereich Remanufacturing von Altkomponenten realisieren. Eine Besonderheit stellt aktuell der Markt für die wiederaufbereiteten Geräte dar. Es handelt sich um einen Wachstumsmarkt, in dem

gerade viele Start-Ups entstehen, die deutlich größere Investitionen anziehen als in der Vergangenheit.

Die **Verbraucher*innen profitieren** insgesamt von **geringeren Lebenszykluskosten** von langlebigen, reparaturfreundlichen und wiederaufbereiteten Geräten. Hohe Kaufpreise steigern auch die Wertschätzung an Geräten. Die Bereitschaft der Verbraucher*innen, höhere Preise für langlebige Produkte zu bezahlen, steigt allerdings nicht linear mit der höheren Lebensdauer. Die Spitzenprodukte bleiben im Nischenbereich. Neben hohen Anschaffungskosten wirken hohe Reparaturkosten als Hemmnis für Reparaturen. Günstige Kaufpreise von Neugeräten beschleunigen den Ersatz von Geräten, die theoretisch noch repariert werden könnten. Mietmodelle sind im privaten Endkonsument*innenmarkt noch marginal. Hier spielen neben komplexen vertraglichen und ökonomischen Unsicherheiten auch datenschutzrelevante Anliegen eine Rolle, wenn z. B. Nutzerdaten zur Umsetzung von Preventive Maintenance erhoben werden.

Die **Datenverfügbarkeit** bezogen auf die Materialzusammensetzung, Sammel- Verwertungs- und Recyclingquoten von Haushaltsgeräten ist gut. Daten zu typischen Reparaturen und Wiederaufbereitungsmaßnahmen von einigen Haushaltsgeräten sind vorhanden oder können kostenpflichtig oder mithilfe von Reparatur- und Wiederaufbereitungsunternehmen erhoben werden. Schwieriger sind die Daten zur Abschätzung von ökonomischen Auswirkungen von Maßnahmen auf Unternehmensebene. Dafür liegen nur wenige Anhaltspunkte vor, z. B. in Form von Finanzflussmodellen im Bereich Mietmodell oder Produktionskosten bei der Herstellung von Refabrikaten, die zum Zweck der Modellierung gegebenenfalls mithilfe von Experteneinschätzungen extrapoliert werden müssen.

3.4.5 Fahrzeuge

Bei Fahrzeugen wurden elf Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 14 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die Bewertungsergebnisse sind in Abbildung dargelegt.

3.4.5.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 14: Fahrzeuge: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Reduktion des motorisierten Individualverkehrs	Es werden weniger km im motorisierten Individualverkehr zurückgelegt. Es wird angenommen, dass die km stattdessen mit Car-Sharing und Ride Sharing zurückgelegt werden.
2	Reduktion der Fahrzeuggröße	Kleinere Fahrzeuge: Segmentverschiebung von großen Fahrzeugen [leichte Lkw, Sport Utility Vehicle (SUV)] zu kleineren Fahrzeugen (Pkws)]. Das geringere Gewicht von kleineren Fahrzeugen senkt den Energieaufwand bei der Herstellung und den Energieverbrauch für den Betrieb des Fahrzeugs.
3	Car Sharing	Umstieg vom eigenen Auto auf Fahrzeuge aus einer gemeinsamen Flotte
4	Ride Sharing (Mitfahrgelegenheiten)	Fahrmuster, bei denen sich Personen mit gleichem oder ähnlichem Fahrtziel eine Fahrt teilen
5	Materialsubstitution	Material wird ersetzt, um einen geringeren betrieblichen Energiebedarf zu erreichen. Der Ersatz von Stahl durch Aluminium (hier betrachtet), Kohlefaser, Magnesium oder hochfestem Stahl reduziert die Lebenszyklus-Emissionen, weil ein geringeres Fahrzeuggewicht zu weniger Kraftstoff in der Nutzungsphase führt.

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
6	Langlebiges Design	Besseres Design (Erleichterung der Wiederverwendung eines Produkts), verstärkte Reparatur und verbesserte Sekundärmärkte
7	Wiederverwendung, Remanufacturing	Ersetzung der Produktion von Ersatzteilen oder sogar von Primärprodukten
8	Closed-Loop-Recycling	Durch die Verbesserung der Verwertungsquote am Ende der Lebensphase erhöht sich der Anteil der als Schrott verwerteten Materialien aus ausrangierten Produkten. Dieses verstärkte Recycling führt schließlich zu einer Verdrängung von Primärmaterialien durch Sekundärmaterialien.
9	Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung	Die Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung verringert die Menge des im Herstellungs- und Fertigungsprozess verwendeten Materialabfalls, wodurch der Bedarf an Materialinput aus dem Fertigungssektor gesenkt wird.
10	Umleitung von Fabrikationsschrott	Produktionsabfälle wie z. B. Verschnitt werden in andere Produktionseinheiten zur Herstellung kleinerer Bauteile umgeleitet. Dadurch wird ein erneutes Einschmelzen vermieden und die Kosten können gesenkt werden.
11	Reduktion der elektrischen Reichweite	Durch eine Verringerung der elektrischen Reichweite eines Fahrzeugs kann an der Batterie gespart werden. Dies spart Kosten, Ressourcen und Energie aufgrund des verringerten Leergewichts des Fahrzeugs.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.5.2 Bewertung

Abbildung 18: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Fahrzeugen

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Reduktion des motorisierten Individualverkehrs	3	1	3	3	2	2	3	2
2	Reduktion der Fahrzeuggröße	2	1	3	3	2	2	3	3
3	Car Sharing	2	1	3	3	2	2	3	3
4	Ride Sharing (Mitfahrgelegenheiten)	3	1	3	3	2	2	3	2
5	Materialsubstitution	1	1	2	1	3	3	3	3
6	Langlebiges Design	2	2	2	3	2	2	3	3
7	Wiederverwendung, Remanufacturing	2	2	2	3	2	2	3	2
8	Closed-Loop Recycling	1	3	2	1	1	3	2	3
9	Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung	1	3	2	3	3	2	3	3
10	Umleitung von Fabrikationsschrott	1	3	2	3	3	2	3	3
11	Reduktion der elektrischen Reichweite	2	2	2	3	2	2	2	2

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.5.3 Synthese

Die Maßnahmen, die zu einer Reduktion des motorisierten Individualverkehrs führen, besitzen das größte **Reduktionspotenzial** für Treibhausgase. Laut IRP (2020) kann eine Reduzierung des Individualverkehrs durch einen höheren Gebrauch von Carsharing-Autos und Mitfahrgelegenheiten die Treibhausgasemissionen von Autos im Jahr 2050 um 19 - 30 % reduzieren. Würden die gefahrenen Personenkilometer mit öffentlichen Verkehrsmitteln substituiert, wären die Einsparungen des Verkehrssektors vermutlich noch größer.

Maßnahmen wie eine Reduktion der Fahrzeuggröße, ein langlebiges Design sowie eine erhöhte Wiederverwendung (Remanufacturing) führen zu moderaten Einsparungspotenzialen von Treibhausgasen. Alle drei Maßnahmen zielen auf eine verringerte Ressourcennutzung ab. Die Fahrzeuge an sich verwenden weniger Material bzw. ein langlebigeres Design oder Wiederverwendung führen dazu, dass weniger Material benötigt wird.

Eher geringere Einsparpotenziale gibt es bei den Maßnahmen der Materialsubstitution, Closed Loop-Recycling oder Maßnahmen, die die Produktionseffizienz fördern. Eine Materialsubstitution von Stahl durch Aluminium führt zu einem leichteren Auto und somit zu einem geringeren Verbrauch, allerdings entstehen in der Produktion höhere Emissionen (IRP 2020).

Eine Reduzierung der elektrischen Reichweite hätte geringere Batteriegrößen und ein geringeres Fahrzeuggewicht zur Folge. Eine geringere Reichweite von Elektroautos könnte jedoch zu einer niedrigeren Akzeptanz von Elektroautos führen. Die potenziellen THG-Einsparungen infolge dieser Maßnahme stehen im Konflikt mit der Akzeptanz von Elektroautos. Eine geringere Akzeptanz von Elektroautos hätte eine negative Auswirkung auf das Einsparpotenzial von THG-Emissionen im Verkehr-Sektor.

Bei dem Einsatz von Kohlenfaserkunststoff als Substitutionsmaterial besteht ein **Zielkonflikt** mit der Recyclingfähigkeit des Autos. Hier muss in der Praxis geprüft werden, ob ein Kompromiss zwischen Recyclingfähigkeit und Carbon Footprint des Fahrzeugs akzeptabel ist.

Die **technologische Reife** und die **markstrukturellen Voraussetzungen** sind bei den meisten Maßnahmen hingegen kein Problem. Viele der Maßnahmen sind nur mit entsprechenden Investitionen, monetären Anreizen und Änderungen der Gesetzesgrundlagen realistisch.

Die **Datenverfügbarkeit** wird insgesamt für den Sektor Fahrzeuge als gut bewertet. Bei vielen Maßnahmen können Daten aus der Studie von IRP (2020) übernommen werden. Es ist aber zu beachten, dass sich die dort verwendeten Daten auf das Referenzjahr 2015 beziehen. Wenn die gefahrenen Personenkilometer im Auto und in öffentlichen Verkehrsmitteln in Deutschland bekannt sind, kann die Maßnahme zur Reduktion des motorisierten Individualverkehrs durch öffentliche Verkehrsmittel modelliert werden.

3.4.6 Hochbau

Im Bereich Hochbau wurden vierzehn Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 15 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die Bewertungsergebnisse können Abbildung entnommen werden.

3.4.6.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 15: Hochbau: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Reduktion der Wohnrauminanspruchnahme	Der Wohnraum pro Bewohner wird reduziert. Somit können mehr Menschen in den bestehenden Gebäuden leben.
2	Reduktion der Büroräuminanspruchnahme und Gemeinsame Nutzung der Büroräume	Mehr Menschen in dem gleichen Büroraum arbeiten lassen
3	Planung für die Demontage von Gebäuden und Herstellung standardisierter Bauelemente	Ein Design, welches den Abbau des Gebäudes begünstigt, erleichtert das Recyceln von Material. Die Standardisierung von Bauteilen erleichtert deren Wiederverwendung nach der Demontage, so dass am Ende des Lebenszyklus mehr wiederverwendbare Elemente zur Verfügung stehen.
4	Verlängerte Lebensdauer von Gebäuden	Durch Renovierung und durch das Design beim Bau des Gebäudes, welches Renovierung erleichtert, wird die Lebenszeit von Gebäuden verlängert.
5	Lokale Beschaffung von Steinen für den Bau	Das Gebäude wird so designt, dass für den Bau des Gebäudes lokale Gesteine verwendet werden. Somit reduziert sich der Transportaufwand.
6	Verwendung von Nebenprodukten aus der Industrie und Bauabfallzuschlägen in Zementmischungen (als Zementersatz)	Zement kann mit industriellen Nebenprodukten (z. B. Flugasche, Hochofenschlacke, Silikatstaub) gemischt werden, um den Einsatz von neu hergestelltem Zement und die damit verbundenen CO ₂ e-Emissionen aus dem Herstellungsprozess zu verringern.
7	Verwendung verschiedener Bindemittel bei der Zementherstellung	Verwendung vom Zement auf der Basis von Kalziumsulfoaluminat (CSA), Celitement oder Solidia als Ersatz für herkömmlichen Zement mit geringeren CO ₂ -Emissionen während des Produktionsprozesses
8	Nutzung von biobasierten Materialsubstituten	Verwendung von Holz als Baumaterial anstatt Beton und Stahl in mehrstöckigen Gebäuden und in Ein- und Mehrfamilienhäusern
9	Einsatz der Partikel Packung Technologie zur Reduzierung der Zementmenge in Betonmischungen	Die Technologie der Partikelpackung kann den Zementgehalt wirksam senken, ohne die Betoneigenschaften negativ zu verändern.
10	Rücknahmesysteme für Dämmstoffabfälle von Baustellen für das Recycling	Aufbau von Rücknahmesystemen für Dämmstoffabfälle von Baustellen, damit sie für das Recycling genutzt werden können.
11	Reduktion der Materialnutzung durch entsprechendes Design	Einsparungen von CO ₂ e-intensivem Material wie Stahl und Beton durch entsprechendes Design.

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
12	Wiederverwendung von Baumaterial	Die Wiederverwendung von Baumaterial von alten Gebäuden in neuen Gebäuden führt zu einem geringeren Verbrauch von neuen Materialien. Beispiel: Ziegelsteine oder Konstruktionsstahl.
13	Erhöhte Verwendung rezyklierter Baumaterialien	Verwendung von gebrochenem Beton aus bestehenden Bauwerken als Zuschlagstoff für neue Betonverwendung von recycelten Kunststoffen
14	Einsatz von Bautechnologien zur Minimierung von Abfällen	Durch den Einsatz von neuen Bautechnologien wie 3D-Druck soll Material eingespart werden.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.6.2 Bewertung

Abbildung 19: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen im Hochbau

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher -*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Reduktion der Wohnrauminanspruchnahme	3	3	3	3	3	2	3	2
2	Reduktion der Büroräuminanspruchnahme und Gemeinsame Nutzung der Büroräume	3	3	3	3	2	1	3	3
3	Planung für d. Demontage v. Gebäuden und Herstellung stand. Bauelemente	3	1	1	3	2	1	3	3
4	Verlängerte Lebensdauer von Gebäuden	3	1	1	1	2	2	3	3
5	Lokale Beschaffung von Steinen für den Bau	1	2	2	3	3	2	3	2
6	Verwendung v. Nebenprodukten aus d. Industrie u. Bauabfallzuschlägen in Zementmischungen (als Zementersatz)	2	2	3	2	2	2	3	3
7	Verwendung verschiedener Bindemittel bei der Zementherstellung	3	1	1	3	2	2	3	2
8	Nutzung von biobasierten Materialsubstituten	3	1	1	2	2	2	3	3
9	Einsatz d. Partikel Packung Technologie zur Reduktion der Zementmenge in Betonmisch.	3	2	2	3	3	1	2	3
10	Rücknahmesysteme für Dämmstoffabfälle von Baustellen für das Recycling	1	3	2	1	2	1	2	3
11	Reduktion der Materialnutzung durch entsprechendes Design	3	1	2	3	2	2	3	3
12	Wiederverwendung von Baumaterial	3	1	1	2	2	3	3	3
13	Erhöhte Verwendung rezyklierte Baumaterialien	2	1	2	3	2	3	2	3
14	Einsatz von Bautechnologien zur Minimierung von Abfällen	3	1	1	2	2	1	1	1

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezah und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.6.3 Synthese

Die für den Sektor Hochbau aufgeführten Circular Economy-Maßnahmen haben fast alle ein großes **Umweltentlastungspotenzial**. Die Verwendung von Dämmstoffabfällen und die Beschaffung von lokalen Steinen für den Bau haben ein etwas geringeres Einsparungspotenzial.

Kosteneinsparungen und Preisreduktionen sind bei einer Reduktion des Wohn- und Büroraums zu erwarten; dies gilt ebenso für ein Rücknahmesystem von Dämmstoffen. Bei allen anderen Maßnahmen kommt es zu mäßigen bis hohen Kostensteigerungen für die Unternehmen. Die gesellschaftliche Akzeptanz der verschiedenen Maßnahmen ist hauptsächlich von der Preisänderung der Wohnfläche abhängig.

Die meisten Maßnahmen haben keine oder nur mäßige **Zielkonflikte**. Die Maßnahme „verlängerte Lebensdauer von Gebäuden“ hat beim Betriebsenergieverbrauch einen Zielkonflikt. Ein renoviertes Haus hat oft einen höheren Betriebsenergieverbrauch als ein neu gebautes Haus.

Die **Datenlage** der Maßnahmen des Sektors Hochbau ist insgesamt mittelmäßig bis schlecht. Viele verfügbare Daten beziehen sich auf Fallstudien einzelner Bauprojekte. Eine Extrapolation der Daten auf die deutsche Bauwirtschaft erweist sich teilweise als schwierig.

Bis auf den Einsatz von Bautechnologien zur Minimierung von Abfällen haben alle Maßnahmen eine ausreichende **technologische Reife**. Allerdings könnte bis 2035 der 3D-Druck auf einen beträchtlichen Marktanteil anwachsen und bis zu 25 % aller Gebäudekomponenten abdecken.

3.4.7 Tiefbau

Im Bereich Tiefbau wurden zehn Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 16 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die Bewertungsergebnisse können Abbildung entnommen werden.

3.4.7.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 16: Tiefbau: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Reduktion des Einsatzes von Baustahl durch Design	Effizienteres Entwerfen und Bauen, damit der Baustahl die gleiche Leistung erbringen kann, aber weniger Material verbraucht wird (z. B. Reduktion von Überspezifikation).
2	Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design	Höhere Differenzierung zwischen den Aufträgen auf Beton. Es besteht die Tendenz, dass Unternehmer den Beton wählen, der den strengsten Anforderungen für das gesamte Gebäude entspricht.
3	Einsatz von neuen Fertigungsverfahren zur Minimierung von Abfällen	Mithilfe neuer Fertigungsverfahren wie beispielsweise 3D-Druck können Bauabfälle verhindert werden.
4	Verwendung alternativer Bindemittel bei der Zementherstellung	Verwendung von Celiment als Ersatz für herkömmlichen Zement, da Celiment die CO ₂ e-Emissionen während des Produktionsprozesses reduziert

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
5	Verwendung alternativer Bindemittel bei der Zementherstellung	Verwendung von Solidia als Ersatz für herkömmlichen Zement. Solidia hat reduzierte CO ₂ e-Emissionen während des Produktionsprozesses, die mit der Betonhärtung kombiniert werden können, um die Menge des vermiedenen CO ₂ e zu erhöhen. Nur anwendbar bei vorgefertigten Bauteilen.
6	Verwendung von Nebenprodukten aus d. Industrie u. Bauabfallschlägen in Zementmischungen (als Zementersatz)	Zement kann mit industriellen Nebenprodukten (z. B. Flugasche, Hochofenschlacke, Silikat Staub) gemischt werden, um den Einsatz von neu hergestelltem Zement und die damit verbundenen CO ₂ e-Emissionen aus dem Herstellungsprozess zu verringern.
7	Verlängerung der Lebensdauer von Infrastruktur	Verschiedene Maßnahmen von der Design- bis zur Nutzungsphase können zu Lebensdauerverlängerungen von Bauten führen.
8	Wiederverwendung von Baustahl	Die Wiederverwendung von Baumaterial von alten Baustrukturen in neuen Baustrukturen führt zu einem geringeren Verbrauch von neuen Materialien (Bsp. Konstruktionsstahl).
9	Wiederverwendung von Strukturbeton	Die Wiederverwendung von Baumaterial von alten Bauten in neuen Bauten führt zu einem geringeren Verbrauch von neuen Materialien (Bsp. Strukturbetonplatten).
10	Zementrecycling mit der Smart Crusher-Technologie	Die Smart Crusher-Technologie setzt Zement aus Betonschutt auf Abbruchbaustellen frei. Der Zement kann wiederverwendet oder als Bindemittel oder Kalkstein-Verbesserer wiederaufbereitet werden.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.7.2 Bewertung

Abbildung 20: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen in Tiefbau

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Reduktion des Einsatzes von Baustahl durch Design	3	3	3	3	2	2	3	2
2	Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design	3	3	3	3	2	2	3	2
3	Einsatz von neuen Fertigungsverfahren zur Minimierung von Abfällen	3	1	1	2	2	1	1	1
4	Verwendung alternativer Bindemittel bei der Zementherstellung (Celitement)	3	1	1	2	2	3	2	3
5	Verwendung alternativer Bindemittel bei der Zementherstellung (Solidia).	3	3	2	2	2	2	3	2
6	Verwendung von Nebenprodukten aus d. Industrie u. Bauabfallzuschlägen in Zementmischungen (als Zementersatz)	3	2	2	2	2	2	3	2
7	Verlängerung der Lebensdauer von Infrastruktur	3	3	3	3	2	1	3	2
8	Wiederverwendung von Baustahl	3	3	3	3	2	1	2	3
9	Wiederverwendung von Strukturbeton	3	3	3	3	2	1	2	3
10	Zementrecycling mit der Smart Crusher-Technologie	3	2	2	2	2	3	3	3

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.7.3 Synthese

Alle Maßnahmen versprechen signifikante **Umweltentlastungspotenziale**.

Durch Materialeinsparungen ergeben sich (zumindest theoretisch gesehen) **Kostensenkungen** für die Unternehmen und Preissenkungen für die Verbraucher*innen. Der Einsatz von neuen Fertigungsverfahren zur Minimierung von Abfällen kann zu höheren Kosten für die Unternehmen und zu höheren Preisen für die Verbraucher*innen führen, da die Technologie noch nicht ausgereift ist.

Der Einsatz von Celitement verspricht eine Reduktion des Treibhausgaspotenzials von bis zu 50 %. Allerdings kann sein Einsatz zu einer Verdreifachung der Zementkosten führen. Es ist davon auszugehen, dass sich diese Kostenänderungen negativ auf die Verbraucherpreise auswirken (**Zielkonflikt**).

Im Sektor Tiefbau ist die **Datenlage** der Maßnahmen, welche sich auf das Design und die Produktion beziehen, eher mittelmäßig. Für Deutschland geltende Reduktionspotenziale sind teilweise schwer zu finden. Im Hinblick auf die Maßnahmen „Wiederverwendung von Strukturbeton und Baustahl“ sowie den Einsatz von neuen Fertigungsverfahren zur Minimierung von Abfällen ist die Datenverfügbarkeit eher schlecht. Dies liegt zum Teil an der mangelnden praktischen Umsetzung der Maßnahmen.

3.4.8 Lebensmittel

Im Bereich Lebensmittel wurden zehn Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 17 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die Bewertungsergebnisse können Abbildung 21: entnommen werden Abbildung .

3.4.8.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 17: Lebensmittel: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Alternative Proteinquellen (1): Umstellung auf eine vegane Diät	Tierische Proteine werden durch pflanzliche Proteine ersetzt
2	Alternative Proteinquellen (2): vegetarische Ernährung, reduzierter Fleischkonsum, Laborfleisch, Insekten	Bei diesem Szenario sind mehrere Möglichkeiten zusammengefasst. In der Modellierung werden die verschiedenen Möglichkeiten evtl. in einzelnen Subszenarien berücksichtigt. Alle Maßnahmen haben eine Reduzierung des Fleischkonsums als Folge.
3	Reduzierung von Lebensmittelabfällen	Lebensmittelabfälle werden auf der gesamten Wertschöpfungskette in den verschiedenen Lebenszyklusphasen reduziert.
4	Reduktion von Abfällen in der Gastronomie	Durch Servicemanagement-Systeme werden Lebensmittelabfälle in der Gastronomie vermieden.
5	Reduktion von Abfällen bei Verbraucher*innen	Durch Konsumverhaltensänderungen werden Lebensmittelabfälle in privaten Haushalten reduziert.
6	Nutzung und Verwertung von B-Ware	Optisch minderwertige Ware (z. B. krumme Gurken, zu kleine Karotten, etc.) wird nicht verfüttert, sondern anderwärtig verwertet. Zum Beispiel Aufbereitung in Schnippel Küchen als gewaschene und geschälte, ggfs. geschnippelte Ware für die (Gemeinschafts-) Gastronomie. Andere Optionen: Verwertung durch die Herstellung von Smoothies, Verarbeitung zu Kräutersalz etc.
7	Zielgerichtete Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen	Die für die Landwirtschaft bereitliegenden Nutzflächen werden mit einem optimal angepassten Einsatz von Ressourcen und optimal an die Mikrofläche angepassten Nährstoffversorgung bearbeitet (Precision Farming kombiniert mit Spot Framing). Neueste Technologien helfen Landwirten beim Ressourcen- und Nährstoffmanagement der Felder.
8	Verbesserung von Monitoring-Maßnahmen zur Vorbeugung von Ernteaussfällen (z. B. durch Schädlingsbefall)	Monitoring des Befalls durch die Kirschessigfliege im Obst- und Weinbau. Sie befällt reifes Weichobst und kann in kurzer Zeit zum Totalausfall ganzer Kulturbestände führen.
9	Abschaffung oder Reduktion globaler oder ggf. überregionaler Ketten oder Wertschöpfungsketten.	Vermarktungskonzepte wie der Transport von Mineralwasser oder Wasser über große Distanzen werden verboten oder stark besteuert (z. B. Mineralwasser, welches aus Italien nach Deutschland transportiert wird, oder Trinkmilch von Norddeutschland nach Süddeutschland und umgekehrt).
10	Substitution von Futtermitteln durch Lebensmittelabfälle aus dem Einzelhandel	Substitution von Futtermittel in der Nutztierhaltung durch Lebensmittelabfälle. Schweinefutter wird durch wärmebehandelte Abfälle aus dem Einzelhandel ersetzt. Durch das Ersetzen von Futtermittel durch Lebensmittelabfällen im Einzelhandel könnten Anbauflächen und CO ₂ e eingespart werden

Quelle: eigene Darstellung

3.4.8.2 Bewertung

Abbildung 21: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Lebensmitteln

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Alternative proteinquellen (1): Umstellung auf eine vegane Diät	3	3	3	3	3	2	3	3
2	Alternative Proteinquellen (2): Vegetarisch, Laborfleisch, Insekten	3	2	2	3	3	2	2	2
3	Reduzierung von Lebensmittelabfällen	3	3	3	3	2	2	2	3
4	Reduktion von Abfällen in der Gastronomie	3	3	3	3	2	2	3	3
5	Reduktion von Abfällen beim Verbraucher	3	3	3	3	3	3	3	2
6	Nutzung/Verwertung von B-Ware	2	3	3	3	2	2	2	2
7	Precision Farming in Kombination mit Spot Farming	2	1	2	3	3	1	2	3
8	Verbesserung v. Monitoring-Maßnahmen z. Vorbeugung v. Ernteaussfällen	2	1	1	3	3	1	3	3
9	Abschaffung oder Reduktion globaler oder ggf. oder Wertschöpfungsketten.	2	3	2	3	3	2	3	1
10	Substitution von Futtermittel durch Lebensmittelabfälle aus Einzelhandel	3	3	2	1	2	3	3	3

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.8.3 Synthese

Ein besonders hohes **Umweltentlastungspotenzial** im Lebensmittelsektor haben Maßnahmen, die zu einer Umstellung der Ernährungsstile in Richtung einer stärker pflanzenbasierten Kost führen. Die Umstellung auf eine stärker pflanzenbasierte Ernährung spart Ressourcen (Flächen, Wasser, Energie, Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln). Zu berücksichtigen ist, dass extensive Tierhaltungssysteme in Deutschland auch zum Biodiversitätsschutz beitragen. Dennoch ist das Einsparungspotenzial von Treibhausgasemissionen dieser Maßnahme enorm.

Ein weiteres großes Potenzial besitzt die Reduktion von Lebensmittelabfällen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Hier müsste in einer vertieften Analyse noch einmal geprüft werden, wo die Potenziale am größten sind, beziehungsweise auch, inwieweit die Umsetzung einfach oder schwierig ist. Das Einsparpotenzial bei Verbraucher*innen und in der Gastronomie ist groß, da es hier zu vielen Lebensmittelabfällen kommt. Allerdings müssen bei diesen Maßnahmen Gewohnheiten umgestellt werden. Verbraucher*innen sind es gewohnt, immer alles zur Verfügung und zur Auswahl zu haben. Eine Gewohnheitsänderung bei Verbraucher*innen wäre wahrscheinlich am einfachsten durch eine Verteuerung der Lebensmittel oder eine Besteuerung für vermeidbare Lebensmittelabfälle zu erreichen.

Neben der Reduzierung von Lebensmittelabfällen hat auch die Wiederverwendung von Lebensmittelabfällen ein großes Einsparpotenzial für Treibhausgasemissionen. Durch die Verwendung von Lebensmittelabfällen von Supermärkten als Schweinefutter kann die Produktion von Futtermittel eingespart werden. Bei dieser Maßnahme muss allerdings der entgangene Nutzen aus der Biogasproduktion berücksichtigt werden.

Weitere Maßnahmen mit nennenswerten Einsparpotenzialen sind eine effizientere Produktion durch Precision Farming, verbessertes Monitoring zur Vorbeugung von Ernteaufgängen, die Nutzung und Verwertung von B-Ware bei der Gemüseproduktion und die Nutzung von Reststoffen aus der Agrarproduktion (z. B. Stroh) als biogene Ressource für die stoffliche oder energetische Nutzung. Hier muss aber jeweils gut geprüft werden, ob nicht schon Nutzungen dieses Reststoffs (z. B. als Einstreu) gegeben sind und was passiert, wenn hierfür ein Ersatz gefunden werden muss.

Transportwege können reduziert werden, indem unsinnige globaler oder ggf. sogar überregionale Wertschöpfungsketten abgeschafft oder zumindest reduziert werden: z. B. Mineralwasser, welches aus Italien nach Deutschland transportiert wird, oder Trinkmilch von Norddeutschland nach Süddeutschland und umgekehrt.

Die Maßnahmen einer zielgerichteten Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen (Precision Farming) und die Verbesserung von Monitoring-Maßnahmen zur Vermeidung von Ernteaufgängen sind beide mit anfänglich **höheren Kosten** für den Landwirt verbunden.

Bei der Maßnahme „Substitution von Futtermittel durch Lebensmittelabfälle des Einzelhandels“ kommt es zu einem **Zielkonflikt** mit Biogasanlagen. In Deutschland werden Lebensmittelabfälle von Supermärkten teilweise für die Biogasproduktion eingesetzt.

Die **Datengrundlage** zu den jeweils erläuterten Maßnahmen ist unterschiedlich gut. Die Maßnahme der Umstellung von tierischen auf pflanzliche Proteine könnte anhand eines Standard-Warenkorbs modelliert werden. Hier könnten unterschiedliche Szenarien modelliert werden, in denen sich die Proteinquellen unterscheiden: vegan, vegetarisch, Proteinquellen aus Insekten oder Laborfleisch.

Für die Maßnahmen, welche sich mit der Reduzierung der Lebensmittelabfälle beschäftigen, werden Daten über die Mengen der Lebensmittelabfälle der gesamten Wertschöpfungskette benötigt. Die Datengrundlage der Maßnahmen Precision Farming und Monitoring wird als schlecht eingestuft.

3.4.9 Textilien

Im Bereich Textilien wurden acht Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 18 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die Bewertungsergebnisse können Abbildung entnommen werden.

3.4.9.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 18: Textilien: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Verlängerung der Lebensdauer	Produktion von Textilien, die Haltbarkeits- und Gebrauchstauglichkeitskriterien erfüllen, so dass diese länger genutzt werden können (Farbbeständigkeit, Formbeständigkeit, Scheuerfestigkeit, Nahtfestigkeit, Langlebigkeit bzw. Haltbarkeit von Reißverschlüssen und Klettverschlüssen etc.).

2	Reparaturfreundliches Design	Ein Beispiel für reparaturfreundliches Design sind leicht heraustrennbare Reißverschlüsse oder eine mögliche Besohlung bei Schuhen. Diese Maßnahmen erfordern eine Mindestanforderung der Qualität an das Design der Kleidungsstücke.
3	Reparaturservice und/oder Service zum Erhalt der Funktionsfähigkeit	Hersteller bieten einen Imprägnier-Service für Wetterjacken oder einen Reparaturservice für Schuhe, Zelte oder Ähnliches an. Die Maßnahmen bedingen die Förderung einer entsprechenden Reparatur-Infrastruktur.
4	Second Hand-Nutzung	Verkauf von Second Hand-Textilien
5	Leasing von Textilien	Kleidung wird geleast, anstatt gekauft zu werden. Kleidungsstücke, welche nur sehr selten getragen werden, zum Beispiel Brautkleider, werden durch Leasing häufiger getragen. Ein Leasing von Kleidungsstücken kann auch dazu führen, dass solche, die aufgrund von modischen oder subjektiven Aspekten von einer Person nicht mehr getragen werden, von einer anderen Person getragen werden können.
6	Faser zu Faser-Recycling	Faser zu Faser-Recycling von Naturfasern und synthetischen Fasern
7	Verwendung von rezyklierten Polyesterfasern	Durch die Verwendung von recyceltem Material verringern sich die CO ₂ e-Emissionen bei der Produktion des Materials.
8	Verwendung von rezyklierten Polyamid-Fasern	Durch die Verwendung von recyceltem Material verringern sich die CO ₂ e - Emissionen bei der Produktion des Materials.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.9.2 Bewertung

Abbildung 22: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Textilien

	Circular Economy-Maßnahmen	Material-nutzung	Unternehmen	Verbraucher*innen	Zielkonflikte	Wechselwirkungen	Daten	Technologische Reife	Markt
1	Verlängerung der Lebensdauer von Textilien	3	1	2	3	3	2	3	3
2	Reparaturfreundliches Design	2	2	2	3	3	2	3	2
3	Reparaturservice und/oder Service zum Erhalt der Funktionsfähigkeit	3	2	2	3	3	1	3	2
4	Second Hand-Nutzung	3	2	3	3	3	3	3	3
5	Leasing von Textilien	2	2	2	1	3	1	3	3
6	Faser zu Faser-Recycling	1	2	2	1	1	1	3	3
7	Verwendung von rezyklierten Polyesterfasern	2	2	2	1	3	2	3	3
8	Verwendung von rezyklierten Polyamid-Fasern	2	2	2	1	3	2	2	3

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.9.3 Synthese

Im Sektor Textilien weisen gerade diejenigen Maßnahmen ein hohes **Treibhausgaseinsparpotenzial** auf, welche zu einer Verlängerung der Nutzungsphase beitragen (z. B. Haltbarkeit verbessern, Reparierbarkeit gewährleisten, Reparaturservice anbieten, zeitloses Design). Wenn Kleidungsstücke häufiger und länger getragen werden, verringert sich der durch den Textilkonsum verursachte CO₂-Fußabdruck und der Ressourcenbedarf (inklusive Wasserfußabdruck, Flächenbedarf etc.).

Dies ist aber ein klarer Gegentrend zu dem Wandel, den die Textilindustrie von 2 - 3 Kollektionen im Jahr hin zu 12 - 14 Kollektionen im Jahr vollzogen hat (die globale Produktion an textilen Fasern hat sich von 1975 bis 2021 verdreifacht). Die globale Textilproduktion hat sich von 2000 bis 2015 verdoppelt. Der durchschnittliche Textilkonsum in der EU beträgt 12,1 kg/Kopf und Jahr. 11 kg Textilien pro Kopf und Jahr werden in der EU entsorgt. Der Einsatz von recycelten Fasern und Faser zu Faser-Recycling besitzt zusätzliche Entlastungspotenziale. Dazu sei angemerkt, dass gut zu prüfen ist, für welche Textilprodukte und zu welchen Anteilen der Einsatz von rezyklierten Fasern sinnvoll ist, damit die Qualität der Produkte nicht leidet. Parallel müssen Maßnahmen ergriffen werden, damit der Einsatz von rezyklierten Fasern nicht zu einer höheren Schadstoffbelastung von Textilien führt.

Zielkonflikte werden für folgende Maßnahme gesehen: Leasing von Kleidungsstücken und Recycling. Das Leasing von Kleidung kann zu höheren Emissionen durch die Mobilität führen. Dies hängt davon ab, wie lange die Kleidung geleast wird. Gerade bei Berufskleidung kann davon ausgegangen werden, dass diese länger bei einem Verbraucher/einer Verbraucherin verbleibt. Gesundheitsgefährdende Chemikalien, mit denen die Textilabfälle belastet sein können, können beim Faserrecycling nicht entfernt werden.

Gut im Blick behalten werden muss der Einsatz von rezyklierten Fasern, für die der Rohstoff aus anderen Wertschöpfungsketten stammt (Fast alle rezyklierten PET-Fasern stammen aus dem Recycling von PET-Flaschen). Hier kann es – wenn der Markt sich weiterhin so rasant entwickelt – zu Rebound-Effekten kommen. Es kann sogar lukrativ werden, PET-Flaschen für das Recycling zu PET-Fasern zu produzieren.

Nach der Einschätzung des Projektteams ist es möglich, für einen Teil der Maßnahmen vergleichsweise gute Abschätzungen zu Einsparpotenzialen abzugeben, während ein anderer Teil der Maßnahmen auf Basis von Annahmen und Berechnungen mit Bandbreiten nur grob abgeschätzt werden kann. Deutschlandspezifische **Daten** sind teilweise schwer zu finden.

3.4.10 Möbel

Im Bereich Möbel wurden sieben Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 19 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die die Bewertungsergebnisse können Abbildung entnommen werden.

3.4.10.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 19: Möbel: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Eine höhere Wiederverwendung von Möbeln	Mehr Gebrauchthandel als heute durch Stärkung des Second-Hand-Marktes

2	Mehr Wiederaufbereitung von Möbeln	Wiederaufbereitung des Produkts zur Optimierung der Lebensdauer, z. B. durch Größenänderung eines Schreibtischs oder Veränderung des Aussehens eines Stuhls durch Neupolsterung, um die "modische" Lebensdauer zu verlängern, oder durch Größenanpassung von Schreibtischen; Möbel werden so designt, dass sie leicht umgestaltet werden können und somit zeitlos sind.
3	Mehr Recycling der Materialien durch weniger Verwendung von Verbundstoffen	Vermeidung von Verbundmaterialien, damit Recycling der verarbeiteten Materialien möglich ist.
4	Materialsstitution (1)	Substitution von Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff durch Alternativen
5	Materialsstitution (2)	Substitution von PE-Fensterbeschlägen durch Metallgestelle und -Schubkästen
6	Materialsstitution (3)	Materialsstitution bei Gartenmöbeln (Aluminium durch Kiefer)
7	Mehr Verwendung von recyceltem Material	Ganze Möbel oder Teile von Möbeln werden mit recycelten Materialien produziert.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.10.2 Bewertung

Abbildung 23: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Möbeln

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nahmen	Verbraucher -*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Eine höhere Wiederverwendung von Möbeln	3	2	3	3	2	1	3	3
2	Mehr Wiederaufbereitung von Möbeln	3	2	3	3	2	1	3	3
3	Mehr Recycling der Materialien durch weniger Verwendung von Verbundstoffen	2	1	2	3	3	3	3	3
4	Materialsstitution (1)	2	2	2	3	3	2	2	3
5	Materialsstitution (2)	1	2	2	3	2	1	3	3
6	Materialsstitution (3)	3	2	2	3	2	1	3	2
7	Mehr Verwendung von recycelten Materialien	3	2	2	3	3	1	3	2

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.10.3 Synthese

Die Umweltmaßnahmen des Möbelsektors beziehen sich auf diverse Studien von einzelnen Möbeln und lassen sich schlecht für den gesamten Möbelsektor verallgemeinern.

Generell war die Informationslage im Sektor Möbel nicht sehr gut. Es gibt wenig Ökobilanzstudien, die das Potenzial von Circular Economy-Maßnahmen abschätzen. Aus bestehenden Studien kann abgeleitet werden, dass Wiederverwendung, Recycling oder energetische Verwertung von Abfällen zu Umweltvorteilen in verschiedenen Umweltkategorien führen. Durch das Wiederverwenden und

Wiederaufbereiten von Möbeln wird die Nutzungsphase der Möbel verlängert, wodurch weniger Möbel produziert werden. Dies spart Materialien ein und wirkt sich positiv auf die Treibhausgasbilanz aus. Ein ähnlich hohes **Einsparpotenzial von Treibhausgasemissionen** wird bei einem Umrüsten von Möbeln gesehen. Das Möbeldesign vereinfacht das Umrüsten der Möbel und ermöglicht somit die Weiternutzung der Möbel. Zwar wird ein gewisser Energieaufwand benötigt, um die Möbel umzurüsten, allerdings ermöglicht dies eine Verlängerung der Nutzungsdauer.

Weitere Maßnahmen mit hohen Einsparpotenzialen sind die Materials substitutionen und die Verwendung von recyceltem Material. Die Maßnahmen der Materials substitutionen umfassen Verbote von einzelnen Verbundstoffen bis hin zu einer Förderung von Holzmöbeln. Durch die Verwendung von recycelten Materialien können rund ein Drittel der Treibhausgasemissionen eines Möbelstückes eingespart werden. Die Auswirkungen der Substitutionen sind je nach Art des vermiedenen Produkts unterschiedlich und können auch zu **Zielkonflikten** zwischen den Umweltkategorien führen. Holzmöbel sind eine potenzielle Kohlenstoffs Senke, wenn ihr Lebenszyklus nicht mehr Treibhausgase freisetzt als ihre Materialien speichern können. Im Vergleich zu Kunststoffmöbeln können Holzmöbel eine geringere Auswirkung auf Ressourcen, aber größere Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Qualität des Ökosystems aufweisen. Die Auswirkungen während der Herstellungsphase eines Holzmöbels sind in erster Linie auf die Abholzung, den Transport und die Verbrennung zurückzuführen, was auch insgesamt hinsichtlich der Freisetzung von Treibhausgasemissionen negative Folgen hat. Stühle aus Kunststoffen können dagegen eine höhere Ressourceninanspruchnahme aufweisen, was auf die Verwendung von Rohöl und dessen Einsatz als Energiequelle während des Lebenszyklus zurückzuführen ist. Der Einsatz von Metallen wie Stahl führt zwar zu längerer Haltbarkeit, doch ist der Stahlherstellungsprozess ressourcenintensiv und auch der Energieverbrauch während der Transportphase aufgrund des höheren Gewichts sehr hoch. Bei der Stahlherstellung wird Eisenerz, das eine nicht erneuerbare Ressource ist, als Rohstoff verwendet. Die Stahlherstellung hat auch andere negative Auswirkungen wie höhere Treibhausgasemissionen während des Stahlherstellungsprozesses. Im Vergleich zum Materialeinsatz von Holz oder Kunststoffen schneidet die werkstoffliche Verwertung von stahlbasierten Produkten besser ab.

Die **Datengrundlage** der Wiederverwendungsquote und Wiederaufbereitung von Möbeln ist mutmaßlich schwach. Viele Second-Hand-Möbel werden privat oder in Second-Hand-Läden weiterverkauft. Eine Umfrage von Statista besagt, dass rund 9 % der Deutschen in den letzten 12 Monaten ein gebrauchtes Möbelstück oder gebrauchte Haushaltsware gekauft haben (Brandt 2022). Eine Materials substitution von Aluminium zu Holz führt zu einem schwereren Gewicht der Möbel. Gerade bei Gartenmöbeln, welche unter Umständen öfters bewegt werden, führt ein erhöhtes Gewicht nicht zu einem gleichwertigen Produkt. Die Datengrundlage von verwendeten Materialien ist gut und somit müsste eine Modellierung dieses Szenarios möglich sein.

3.4.11 Beleuchtung

Im Bereich Möbel wurden elf Circular Economy-Maßnahmen identifiziert. Tabelle 20 enthält eine Kurzbeschreibung der Maßnahmen; die Bewertungsergebnisse können Abbildung entnommen werden.

3.4.11.1 Kurzbeschreibung

Tabelle 20: Beleuchtung: Kurzbeschreibung von Circular Economy-Maßnahmen

Nr.	Circular Economy-Maßnahme	Kurzbeschreibung
1	Steigerung Sammlung	Bessere Sammelmengen als heute
2	Reduktion Entsorgung über Hausmüll	Gasentladungslampen werden nicht mehr in Hausmüll entsorgt.
3	Verwertung Leuchtstoffpulver	Rückgewinnung von z. B. seltenen Erden
4	Stoffliche Verwertung	Thermische Verwertung, die bisher fast ausschließlich zum Einsatz kommt, wird teilweise durch stoffliche Verwertung substituiert.
5	Schadstoffentfrachtung	Bezogen auf Quecksilber
6	Materialeinsparung bei Herstellung	Durch eine automatisierte Fertigungstechnik wird Material in der Produktion eingespart.
7	Verzicht auf Deko-Lampen	Offenbar wachsende Marktanteile (Märkte für Wohnraumbeleuchtung schrumpfen sogar, Wachstum bei Traglampen und vermutlich auch bei Lampen, die für Dekozwecke eingesetzt werden)
8	Verwertung Platinen	Beim Recycling steht bisher Glas und Metall im Vordergrund. Platinen werden entnommen und an Elektro-Recycler übergeben.
9	Langlebiges Design	Lebensdauerverlängerung durch Design (Verwendung entsprechender Materialien und Produktionsprozess) oder durch Nutzung (Vermeidung häufiger Schaltzyklen)
10	Lampensysteme mit austauschbaren Leuchtmitteln	Beitrag zum Ressourcenschutz durch geförderte Langlebigkeit von Beleuchtungen. Hersteller sollen Leuchten so gestalten, dass das Leuchtmittel einfach ersetzt werden kann. Vermeidung von fest verbauten LEDs, welche nicht austauschbar sind.
11	Beleuchtung als Dienstleistung	Modularer Aufbau und Leuchtendesign ermöglichen schnelle Wartung und Aufrüstung, einfache Demontage und Wiederverwertung der Komponenten sowie klare Rückverfolgbarkeit von der Herstellung bis zur Wiederverwendung.

Quelle: eigene Darstellung

3.4.11.3 Bewertung

Abbildung 24: Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen bei Beleuchtung

	Circular Economy-Maßnahme	Material-nutzung	Unter-nehmen	Verbraucher-*innen	Zielkonflikte	Wechsel-wirkungen	Daten	Technolo-gische Reife	Markt
1	Steigerung Sammlung	2	2	2	3	3	3	3	3
2	Reduktion Entsorgung über Hausmüll	1	2	2	3	2	1	3	3
3	Verwertung Leuchtstoffpulver	1	3	2	3	3	3	3	1
4	Stoffliche Verwertung	1	1	2	3	3	1	3	3
5	Schadstoffentfrachtung	1	1	2	2	2	1	3	3
6	Materialeinsparung bei Herstellung	3	3	3	3	3	1	2	1
7	Verzicht auf Deko-Lampen	3	1	3	3	2	1	3	3
8	Verwertung Platinen	1	2	2	3	3	1	1	3
9	Langlebiges Design	1	2	2	3	3	3	3	3
10	Lampensysteme mit austauschbaren Leuchtmitteln	3	2	3	3	3	1	3	2
11	Beleuchtung als Dienstleistung	3	2	2	3	3	1	3	3

Quelle: eigene Darstellung

Anmerkung: Zu Punktezahl und Farbcodierung s. Abbildung 5

3.4.11.4 Synthese

Von den Maßnahmen für den Sektor Beleuchtung haben nur vier ein großes **Umweltentlastungspotenzial**. Alle vier Maßnahmen führen zu einem reduzierten Materialverbrauch bei der Produktion oder zu einer geringeren Produktion von Beleuchtungssystemen insgesamt. Bei einer gesteigerten Materialeffizienz in der Produktion werden Materialeinsparungen von bis zu 30 % durch den Wegfall von Zusatzwerkstoffen für mechanische und elektrische Verbindungen erwartet. Die Maßnahme, welche Lampensysteme mit austauschbaren Leuchtmitteln fördert, ermöglicht sowohl die Reparatur von Beleuchtungssystemen als auch ein Upgrade der Leuchten auf effizientere Lichtquellen.

Großes Umweltentlastungspotenzial wird auch für die Maßnahme der Beleuchtung als Dienstleistung gesehen, insbesondere in Bezug auf gewerbliche Installationen. Diese Maßnahme könnte zu Ressourceneinsparungen durch geschlossene Materialkreisläufe und mehrfache Wiederverwendungen führen.

Ein eher moderates Umweltentlastungspotenzial wird für die Maßnahme „Steigerung der Sammlung von Altleuchten“ gesehen. Recycling sollte als Teil des Produktkonzeptes angesehen werden. Das Umweltentlastungspotenzial der restlichen Maßnahmen wird als eher gering eingestuft.

Die **Unternehmenskosten** reduzieren sich bei Anwendung der beiden Maßnahmen „Verwertung von Leuchtstoffpulver“ und „Materialeinsparung bei der Herstellung“. Die Leuchtstofflampen, welche Leuchtstoffpulver verwenden, verschwinden aufgrund ihres Verbots langsam vom Markt; somit sinkt das Potenzial der Leuchtstoffpulver-Verwertung.

Die **Datenverfügbarkeit** dieses Sektors wird insgesamt als schlecht eingestuft. Bei vielen Maßnahmen muss mit Annahmen gerechnet werden.

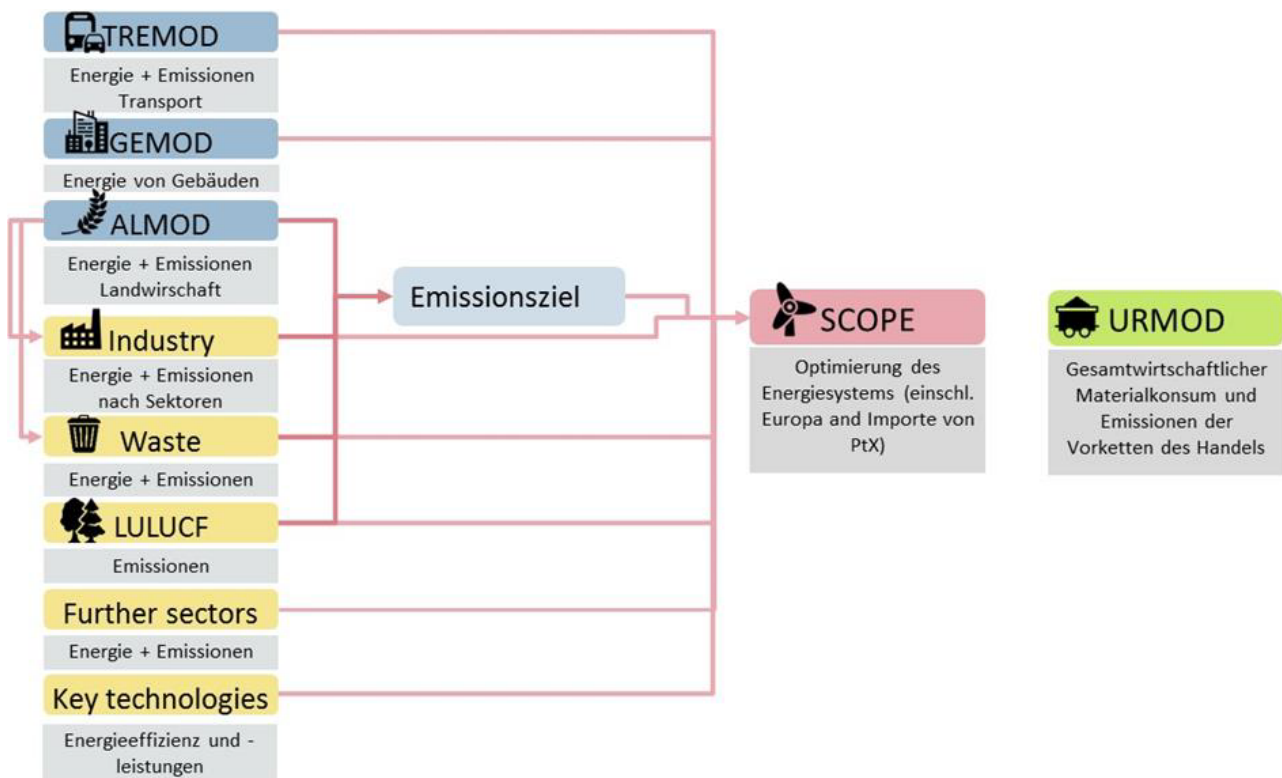
Die **technologische Reife** ist bei allen Maßnahmen bis auf zwei gegeben. Bei der Materialeinsparung bei der Herstellung handelt es sich um eine Innovation; während bei der Verwertung der Platinen die technologischen Voraussetzungen unklar sind.

3.5 Existierende Modelle zur Bewertung der qualitativen und quantitativen Folgenabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen

3.5.1 Umweltbundesamt: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE

Die RESCUE-Studie ist mit Blick auf die Frage der Modellierung und Folgenabschätzung von Circular Economy-Maßnahmen insofern von besonderer Relevanz, als bei der Betrachtung von Transformationspfaden hin zu einer Treibhausgasneutralität in Deutschland explizit auch die Rohstoffinanspruchnahme quantitativ berücksichtigt wird. In RESCUE werden zur Beschreibung der Lösungs- und Handlungsspielräume eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen in sechs Szenarien gebündelt. Diesen Szenarien ist gemeinsam, dass sie für Deutschland eine Treibhausgasminderung bis 2050 von mindestens 95 % und von mindestens 55 % bis 2030 gegenüber 1990 vorsehen. Die Szenarien unterscheiden sich u. a. im Grad der Exportorientierung der deutschen Wirtschaft, im Ambitionsniveau von Maßnahmen im Zeitverlauf und im Ausmaß angenommener Verhaltensänderungen bis hin zu Suffizienz. RESCUE ist kein eigenständiges, geschlossenes Modell, sondern beruht auf einem Verbund aus insgesamt fünf Modellen, die mit sektor- und branchenspezifischen Detailanalysen ergänzt wurden, vgl. die nachstehende Abbildung .

Abbildung 25: Modellfamilie der RESCUE-Studie



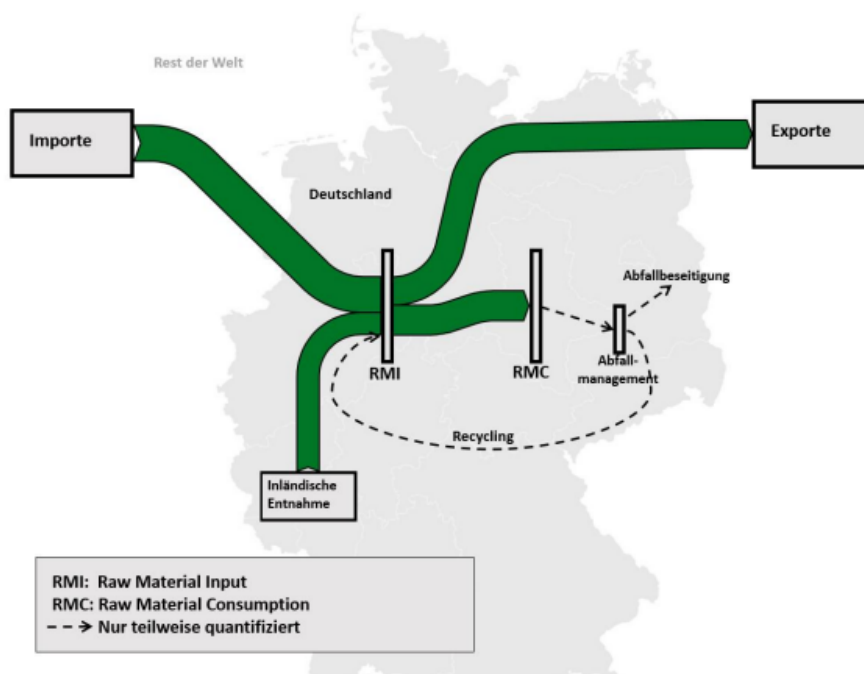
Quelle: Purr et al. (2019)

Dabei beruht die Modellierung im Verkehrsbereich auf TREMOD (Transport Emission Model) und im Bereich Raumwärme auf dem Gebäude-Modell GEMOD. Für den Bereich Landwirtschaft wurde

das Modell ALMOD (Agriculture and LULUCF Model) herangezogen. Die Energiemodellierung basiert auf SCOPE (Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems) in Kombination mit den industriellen branchenspezifischen Analysen sowie dem Abfallbereich. Die damit ausgelöste gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung sowie die vorgelagerten Emissionen werden mit dem umweltökonomischen Rohstoff- und Treibhausgas-Modell (URMOD) modelliert.

Grundlage für URMOD ist eine Input-Output-Tabelle, die die Produktionsverflechtungen der deutschen Wirtschaft abbildet. Die Erstellung von Szenarien folgt einem komparativ-statischen Ansatz. Da in URMOD der Rohstoffbedarf für die Herstellung von Importen und Exporten mit einbezogen wird, ist auch die Betrachtung von Produktionsverlagerungen möglich. URMOD erlaubt somit eine Übersicht über die aggregierten Stoffströme in der deutschen Volkswirtschaft (inländische Primärrohstoffentnahme, Importe und Input von inländischen Sekundärmaterialien) sowie der Exporte ins Ausland. Die in den Szenarien getroffenen Annahmen zur Rohstoffinanspruchnahme werden schwerpunktmäßig im RMC (Raw Material Consumption), also der Primärrohstoffnutzung für den inländischen Konsum, dargestellt. Darüber hinaus wird auch der Raw Material Input (RMI) berechnet, also der gesamte Primärrohstoffeinsatz. Dieser umfasst auch diejenigen Rohstoffe, die für den Export von Gütern aufgewendet werden, vgl. die nachstehende Abbildung .

Abbildung 26: Rohstoffindikatoren und damit verbundene Stoffströme in der RESCUE-Studie



Quelle: Purr et al. (2019)

Beide Indikatoren, RMC und RMI, werden weiter nach den Kategorien Biomasse, fossile Energieträger, Mineralien und Metalle differenziert.

3.5.2 International Resource Panel (IRP): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, ODYM-RECC

Diese vom International Resource Panel (IRP) der UNEP für die G7-Staaten erarbeitete Studie (IRP 2020) untersucht den Beitrag der Ressourceneffizienz zur Verringerung der Treibhausgasemissionen. Konkret werden im Bericht in einem globalen Ansatz entlang der Zeitachse bis 2060 Materialeffizienzstrategien für eine kohlenstoffarme Zukunft für die Bereiche Produktion und Nutzung von Wohngebäuden und leichten Nutzfahrzeugen adressiert. Das hierfür eingesetzte Modell ODYM-RECC¹⁸ beruht auf einer integrierten Bottom-up-Modellierung. Dabei folgt das Modell dem Grundprinzip der dynamischen Stoffstromanalyse, d. h. es beruht auf einer massenbilanzierten Beschreibung von Materialbeständen und -strömen, um die globalen Auswirkungen der Materialeffizienz auf Treibhausgasemissionen zu erfassen.

Die Modellierung umfasst die Produktion von Primärmaterialien, die Verwendung von Sekundärmaterialien, den Materialgehalt von Produkten, die Herstellung, Verwendung und die Entsorgung von Produkten. Der Bestand an Produkten einschließlich der Zu- und Abflüsse werden ebenso einbezogen wie der Energiebedarf für den Betrieb des Fahrzeug- und Gebäudebestands. Für die einzelnen Lebenszyklusabschnitte wird die Materialbilanz (einschließlich Produktausbeute und Abfallerzeugung), der Energieverbrauch und die Emissionen auf der Grundlage von Daten aus empirischen Beobachtungen oder technischen Berechnungen berücksichtigt.

Zur Darstellung der künftigen Entwicklung von Fahrzeugen und Wohngebäuden werden sogenannte Archetypen genutzt; dies sind anschauliche Darstellungen von Referenzpraktiken unter Berücksichtigung von künftigen Wohngebäuden mit verschiedenen energetischen Standards und Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebstechnologien. Auf der Grundlage ingenieurwissenschaftlicher Modelle wurde für die einzelnen Archetypen der jeweilige Materialbedarf, der Energiebedarf in der Nutzung unter Einbezug der Energiemixe, regionaler Klimazonen und regionaler Produktnutzungsmuster bestimmt. Davon ausgehend wurde die Umsetzung von Materialeffizienzstrategien, wie höhere Ausbeute, leichtere Komponenten und andere Materialien, modelliert.

Die nachstehende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fasst die in der Studie verfolgten Strategien zur Steigerung der Materialeffizienz und Modellannahmen für die beiden betrachteten Sektoren zusammen.

¹⁸ Open Dynamic Material Systems Model for the Resource Efficiency-Climate Change

Abbildung 27: Im Modell ODYM-RECC betrachtete Strategien zur Steigerung der Materialeffizienz und Modellannahmen

Strategy	Residential buildings	Light duty-vehicles
Using less material by design – light-weighting	Lighter buildings: Using less material by optimized design and engineering without loss in functionality.	Smaller vehicles: Segment shift from large vehicles (light trucks, sports utility vehicles) to smaller ones (passenger cars).
Material Substitution	Construction materials with lower life-cycle emissions are used. Wooden buildings have fewer life-cycle emissions than concrete or brick buildings. While other material options exist, wood is particularly effective because of its carbon sequestration capacity.	Material is substituted to achieve less operational energy demand. Replacing steel with aluminium (considered here), carbon fibre, magnesium or high-strength steel reduces life-cycle emissions, because lower vehicle weight saves fuel in the use phase.
Improvement of fabrication yield	Fabrication yield improvements (FYI) reduce the amount of material scrap used in the fabrication and manufacturing process, thereby lessening the demand for material input from the manufacturing sector.	
Improvement of End-of-Life (EoL) recovery rate	The improvement of the EoL recovery rate increases the share of materials salvaged as scrap from discarded products. This increased recycling eventually leads to a displacement of primary materials by secondary materials.	
Diversion of scrap	Manufacturing scrap, like trimmings or cuttings, is diverted into other manufacturing units to make smaller components. This avoids re-melting and may reduce costs.	
More intensive use (fewer products are required to provide the same basic service)	Peer-to-peer lodging, increased household size/cohabitation and shift from single to multi-family houses.	Car-sharing (shift from the personal car to cars from a shared fleet) and ride-sharing (driving patterns where people with same or similar driving destinations share a ride) are considered.
Product lifetime extension	Better design (facilitating repurposing of a product), increased repair and enhanced secondary markets.	
Recovery, remanufacturing and reuse of components	Replacement of the production of spare parts or even primary products.	

Quelle: IRP (2020)

Mit dem Modell ODYM-RECC werden keine ökonomischen Betrachtungen vorgenommen, weder in Form von Kosten auf der (mikroökonomischen) Prozessebene, noch von sektorübergreifenden Interferenzen auf der (makroökonomischen) sektoralen Ebene.

In der vom IRP erarbeiteten Studie wird auch die Landschaft bestehender Modelle mit folgenden Kernergebnissen reflektiert:

- Die (in der Praxis vorherrschende) Praxis des Downcyclings wird in verfügbaren Modellen bislang noch nicht systematisch abgebildet. Idealerweise müssten die Modelle in der Lage sein, die Materialqualität zu verfolgen – etwa die Zusammensetzung von Legierungen – und optimale Recyclinglösungen für verschiedene Produkt- oder Materialkategorien zu finden.
- Ebenso wird der Zusammenhang zwischen Materialeinsatz für Produkte und dem Energieverbrauch bei der Nutzung der Produkte nur punktuell abgebildet, aber nicht in großen Modellen beschrieben.
- Die Abbildung der gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen und der Wirkungen auf Emissionen, Beschäftigung, inländische Wertschöpfung und Ressourcenverbrauch beruht vielfach auf vergleichenden statischen Input-Output-Modellen. Diese Modelle vereinfachen die realen Zusammenhänge, wodurch bspw. Zielkonflikte nur näherungsweise untersucht werden können.
- Vorteil ökonomischer Gleichgewichtsmodelle ist, dass Preise und (Material-) Mengen einer ökonomischen Logik folgen und dadurch auch wirtschaftspolitische Instrumente wie Ressourcensteuer abgebildet werden können. Schwer abbildbar sind hier allerdings Trade-Offs (etwa zwischen Materialeinsatz in der Herstellung und dem Energieverbrauch bei Nutzung von Produkten) oder auch die Verfügbarkeit von Materialien aus dem Bestand für Recyclingstrategien.

Insgesamt kommt das IRP zum Schluss, dass Modelle, die Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und zur Steigerung der Ressourceneffizienz integriert betrachten, noch in einem frühen Entwicklungsstadium sind.

3.5.3 Umweltbundesamt: Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE)¹⁹

In dieser noch laufenden²⁰ Folgestudie zu der in Abschnitt 3.5.1 vorgestellten RESCUE-Studie wird die übergeordnete Zielsetzung verfolgt, den Lösungsraum für eine treibhausgasneutrale und nachhaltige Gesellschaft weiter auszudifferenzieren. Dazu wird die Sichtweise und Logik der RESCUE-Studie (sogenannte Optimierungslogik, bei der aus wissenschaftlicher Sicht ermittelt wird, welche Pfade notwendig sind, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen) mit der Logik von Politik-Szenarien verknüpft, mit denen untersucht wird, welche Maßnahmen als politische Sicht unterlegt werden müssen, um die favorisierten Transformationspfade umzusetzen. Vergleichbar zu RESCUE wird auch bei CARE eine Modellfamilie mit spezifischen Sektor-Modellen eingesetzt, darunter:

- BuildingSTar für Gebäude
- FORECAST für elektrische Hausgeräte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Industrie sowie prozessbedingte Emissionen
- TEMPS für Verkehr
- PowerFlex für die Stromversorgung und netzgebundene Wärmeversorgung
- ENUSEM für andere Umwandlungssektoren und flüchtige Emissionen des Energiesektors
- Waste_Mod für Abfallwirtschaft
- LiSE für Landwirtschaft

In CARE werden drei Szenarien betrachtet:

- Szenario 1 basiert auf dem GreenSupreme-Szenario der RESCUE-Studie und wird in CARE allenfalls aktualisiert und auf Kompatibilität mit den Zielen des Bundes-Klimaschutzgesetzes überprüft.
- Szenario 2 umfasst ein Zielszenario, in dem das Ambitionsniveau zur Treibhausgasminderung im Jahr 2030 zwischen den derzeit geltenden nationalen Zielen und Szenario 1 (GreenSupreme) liegt.
- Die genaue Ausrichtung von Szenario 3 ist offen und umfasst beispielsweise die Nutzung von Wasserstoff zur Dekarbonisierung, die Nutzung von CCS (Carbon Capture Storage) und CCU (Carbon Capture Usage), negative Emissionen auf Basis von CO₂-Abscheidung aus der Luft (DAC; Direct Air Capture) oder aus der energetischen Biomassenutzung (BECCS; Bioenergy with Carbon Capture and Storage)) sowie Suffizienz wie Reduktion der Wohnfläche oder des Milch- und Fleischkonsums.

Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz bzw. konkrete Maßnahmen einer Circular Economy sind zwar nicht Gegenstand von CARE, sind aber in den Szenarien implizit enthalten.

¹⁹ Forschungsnehmer dieser Studie sind unter der Leitung des Öko-Instituts die Partner Fraunhofer ISI und Fraunhofer IEE

²⁰ Geplante Laufzeit bis September 2023

3.5.4 Fazit

Die Studie des IRP bestätigt die von den Autor*innen der Machbarkeitsstudie bereits zu Beginn der Arbeiten formulierten These, dass statische Modelle/Gleichgewichtsmodelle allein nicht ausreichend sind. Der Vorschlag für die Modellierungsphase beruht daher auf einem multiplen Methodenset und beinhaltet eine systematische Verknüpfung von

- Produktperspektive (Ökobilanzierung/LCA),
- Materialperspektive (Materialflussmodellierung, FORECAST) und
- Betrachtung Makroökonomie/Gesellschaft (EE-MRIO, ISI-Macro)

Das Methodenset für die Modellierungsphase greift somit Vorschläge von ODYM-RECC auf und erweitert diese mit ökonomischer Betrachtung.

Hinsichtlich der Frage der Nutzung von produktions- und konsumbasierten Ansätzen in der Modellierung bietet sich ein Vorgehen analog zur RESCUE-Studie an. Abweichend zur gängigen Vorgehensweise bei Klimaschutzszenarien, bei denen in der Regel nur die Treibhausgasemissionen im Inland abgebildet werden, müssen auch importierte Rohstoffe und damit zusammenhängende Umweltauswirkungen auch außerhalb Deutschlands mit abgebildet werden. Umgekehrt sollte aber nur der RMI für den inländischen Verbrauch, also die RMC berücksichtigt werden, da Circular Economy-Maßnahmen bei einem Modell Deutschland unmittelbar nur im Inland wirken (auch wenn im Idealfall davon ausgegangen werden kann, dass geeignete Maßnahmen auch in anderen Ländern ergriffen werden).

Die in RESCUE vorgenommene Bündelung von Einzelmaßnahmen zu konsistenten Szenarien ist zwar notwendig, doch ist es nicht einfach, angenommene Entwicklungen und abgebildete Maßnahmen zurückzuverfolgen. Hier muss in der Modellierungsphase ein Weg beschritten werden, der die Transparenz sicherstellt. Möglicherweise sollte in der Modellierungsphase ähnlich wie bei CARE eine geringe Anzahl an Szenarien definiert werden. Sowohl in RESCUE als auch in CARE enthalten die Szenarien bereits implizit Circular Economy-Maßnahmen. Das muss bei der Festlegung eines „Business-As-Usual-Szenarios“ berücksichtigt werden, sofern es nicht möglich ist, den Effekt dieser „vorhandenen Maßnahmen“ systematisch getrennt auszuweisen.

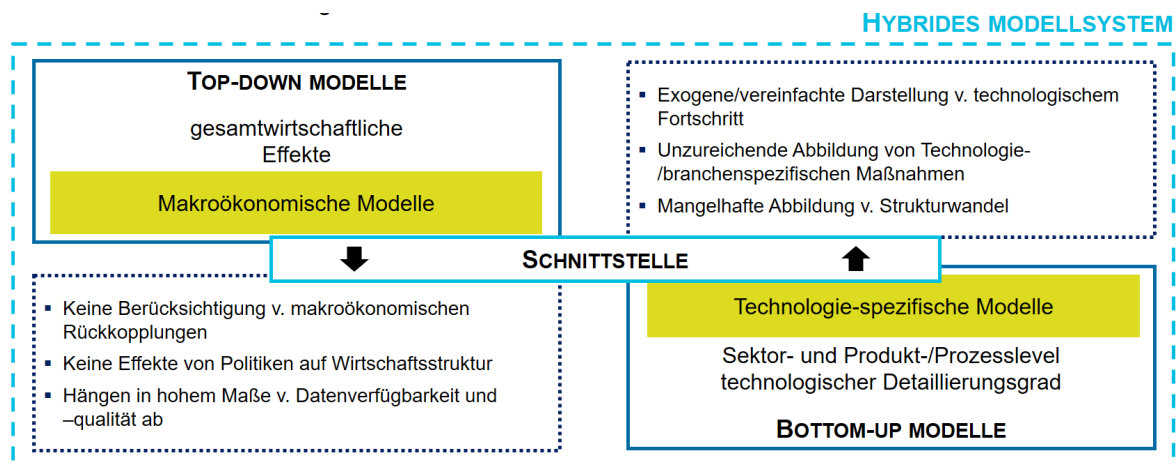
Bei der Festlegung der Baseline und der Eckpunkte von Szenarien bietet sich die Orientierung am Dekarbonisierungsszenario (Klimaschutzszenario) aus CARE als Referenzszenario mit den Zeitpunkten 2030 und 2045/2050 als Stützwerte an. Die hier angenommenen exogenen Faktoren und Annahmen könnten als Ausgangspunkt übernommen werden, um den Mehrwert von Maßnahmen einer Circular Economy abzubilden. Während es bei den Industrieprozessen machbar ist, bereits angenommene R-Maßnahmen aus den Klimaschutzszenarien herauszurechnen, ist dies bei den anderen Sektoren modellbedingt schwieriger.

Aus der Studie des IRP kann der Schluss gezogen werden, dass angenommene Technik-Optionen mit Hilfe von Archetypen veranschaulicht werden sollten. Dabei ist es jedoch wichtig, die Technik-Optionen realistisch auf ihre Umsetzbarkeit einzuschätzen unter der generellen Maßgabe, dass es bei den Annahmen zur Modellierung auf eine Kombination von effizienter Technik und sozialen Innovationen ankommt.

3.6 Vorschlag eines Circular Economy-Bewertungsmodells für die Hauptstudie, inkl. Szenarienbildung

Quantitative modellbasierte Analysen werden heutzutage vielseitig genutzt, und zur Beantwortung von wirtschafts-, ressourcen-, energie- und klimapolitischen Fragestellungen auf regionaler, nationaler und globaler Ebene herangezogen. Das gewählte Modellinstrument hängt jedoch oft von Fragestellung, Auftraggeber, Spezialisierung des Forschungsteams und Zielgruppe ab. In diesem Zusammenhang werden oft verschiedenste Szenarien entwickelt, analysiert und diskutiert, welche dann als Grundlage für den politisch/unternehmerischen Entscheidungsprozess dienen. Die Wahl des geeignetsten Modellierungsansatzes stellt für jeden Modellierer eine mehr oder minder herausfordernde Aufgabe dar. So ist die Auswahl an Modelltypen (siehe Abbildung ; top-down mit meist gesamtwirtschaftlichem Ansatz ohne ausreichende technologische Tiefe, bottom-up mit dem Ansatz technologischer Tiefe, ohne die gesamtwirtschaftlichen Zusammenhänge zu beachten) und Projektionszielen (explorativ, normativ oder kostenorientiert) ebenso vielfältig wie deren inhaltliche Schwerpunktsetzung (Herbst 2017).

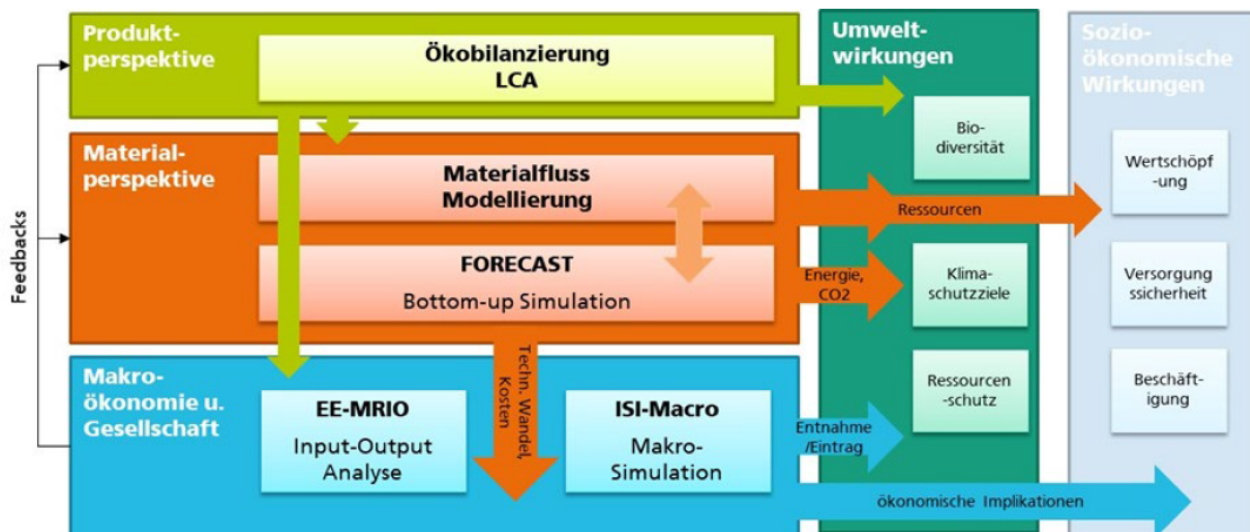
Abbildung 28: Schematische Darstellung von Modelltypen und deren Charakteristika als hybrides System



Quelle: Herbst (2017)

3.6.1 Vorschlag eines Bewertungsmodells

Das vorgeschlagene sektorübergreifende hybride Bewertungsmodell (siehe Abbildung) ermöglicht es, die Schwächen und Grenzen der „konventionellen“ Top-down- und Bottom-up-Modelle zu überwinden und die Stärken der unterschiedlichen Modelle zu nutzen. Dies bedeutet, dass es einerseits möglich ist, den systemisch gesamtwirtschaftlichen Kontext der Circular Economy zu verstehen, und andererseits Wirkungen einzelner/alternativer Circular Economy- und Technologieoptionen mit hohem Detaillierungsgrad zu untersuchen. Ziel des Bewertungsmodells ist, eine qualitative und quantitative Folgeabschätzung der in der vorliegenden Machbarkeitsstudie definierten Circular Economy-Maßnahmen in den Schlüsselsektoren in Deutschland zu ermöglichen.

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Bewertungsmodells

Quelle: eigene Darstellung

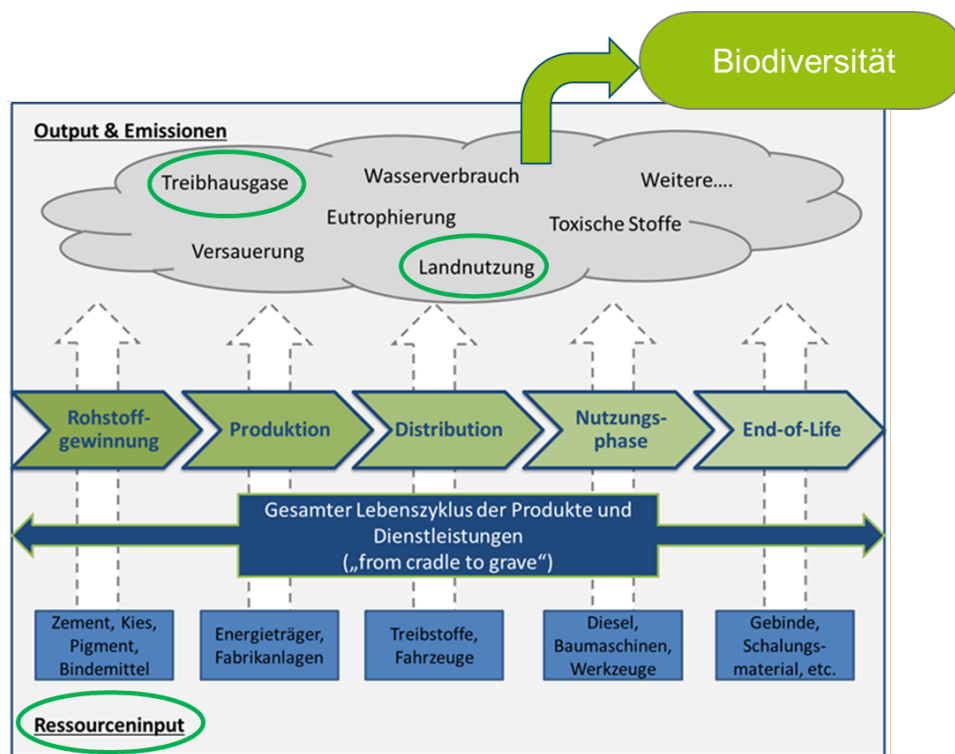
Wie in Kapitel 3.5 diskutiert gibt es eine Vielzahl an Modellen, die die unterschiedlichsten Fragestellungen zur Circular Economy beantworten können. Im vorgeschlagenen Bewertungsmodell kommen eine Reihe der wichtigsten Methoden und Modelle zum Einsatz, die derzeit in Deutschland angewendet werden. Hierzu gehören

- Ökobilanzierung (LCA) zur Abbildung der **Produktperspektive**,
- Materialflussanalyse und Bottom-up-Simulation zur Abbildung der **Material-/Grundstoffperspektive**
- sowie die makroökonomische Modellierung zur Berücksichtigung der **gesamtwirtschaftlichen Perspektive** (z. B. EE-MRIO-Analyse, makroökonomische Modellierung).

3.6.1.1 Ökobilanzierung

Ökobilanzierung (LCA) als typische Bottom-up-Methode verfolgt in einem holistischen Ansatz den gesamten Lebensweg von Produkten oder Dienstleistungen, d. h. die Quantifizierung relevanter Stoff- und Energieströme entlang des Lebenszyklus von konkreten Produkten und Wertschöpfungsketten (siehe Abbildung). Sie erlaubt insbesondere, die Potenziale, die mit einer effektiven Umsetzung von R-Strategien einhergehen, mit einem umfassenden Set an Indikatoren, abzubilden und die potenziellen Umweltauswirkungen von Produkt- oder Prozessalternativen zu bewerten.

Abbildung 30: Schematische Darstellung Ökobilanzierung (LCA)



Quelle: eigene Darstellung

Zusammenfassend ergibt sich folgender Nutzen durch die Verwendung von Ökobilanzierung in der Bewertung:

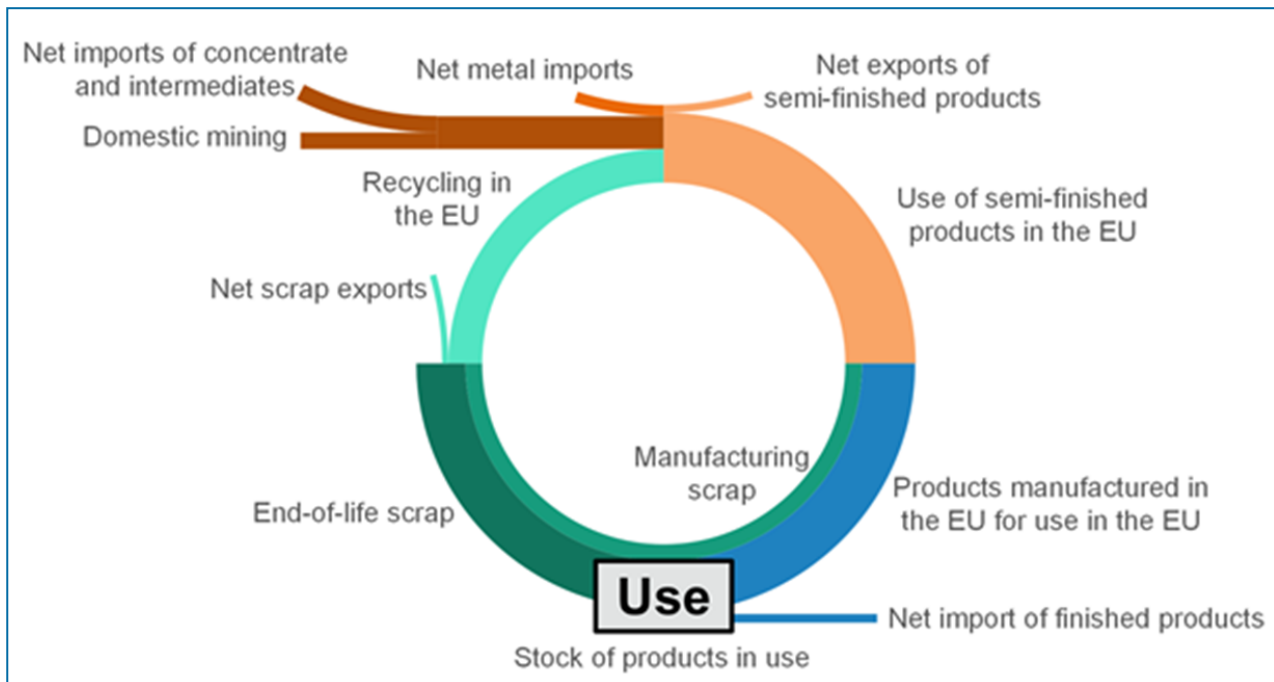
- Holistischer Blick auf potenzielle Umweltbelastungen,
- Zoom auf besonders relevante Bereiche/Produkte,
- Ergänzung der MRIO- & MFA-Ergebnisse,
- z. B. zusätzlich für „Hotspots“,
- z. B. für blinde Flecken („Blind Spots“), und
- Schließung von Datenlücken.

3.6.1.2 Materialflussanalyse (MFA)

Die Materialperspektive im Sinne einer Verfolgung von physischen Materialströmen durch das Wirtschaftssystem in seiner Gänze, also den anthropogenen Rohstoffkreislauf vom Bergbau über Produktionsprozesse zur Nutzungsphase und schließlich Entsorgung, Sammlung, Aufbereitung und Recycling, lässt sich durch den Einsatz von **Materialflussanalyse-Modellen (MFA)** repräsentieren (siehe Abbildung). Diese können sowohl auf ein einziges Material fokussiert sein als auch die verschiedenen Materialien eines Anwendungssystems darstellen. Materialflussmodelle erlauben die Analyse von Wechselwirkungen oder Fortpflanzungseffekten durch Änderungen in einer Stufe des Rohstoffkreislaufes auf alle weiteren Stufen des Zyklus. Sie helfen so dabei, Zielkonflikte beispielsweise zwischen Miniaturisierung/Materialeinsparung und Rezyklierbarkeit oder zwischen längerer Produktlebensdauer und Recyclingpotenzial aufzuzeigen und zu quantifizieren. Darüber hinaus sind

sie Grundlage für die Abschätzung der Effekte von Circular Economy-Maßnahmen auf die Versorgungssicherheit.

Abbildung 31: Schematische Darstellung Materialflussmodellierung (MFA)



Quelle: eigene Darstellung

Zusammenfassend ergibt sich folgender Nutzen durch die Verwendung von Materialflussmodellierung in der Bewertung:

- Berücksichtigung anthropogener Bestände,
- Ermittlung und Projektion von Recycling- und weiteren Circular Economy-Indikatoren,
- detaillierte Abbildung von Materialeffizienz- und Recyclingpotenzialen,
- Analyse von Handelsverflechtungen und Versorgungssicherheit

3.6.1.3 Energienachfrage-Simulationsmodell FORECAST

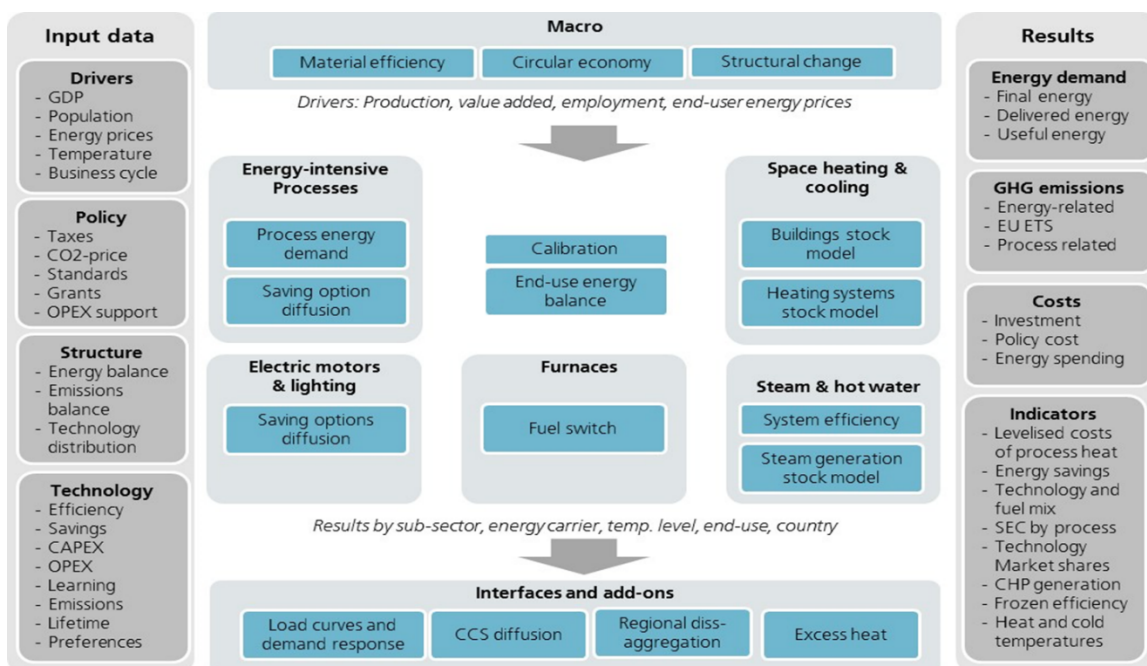
Das Bottom-up-Energienachfrage-Simulationsmodell FORECAST (Fleiter et al. 2018) wird eingesetzt, um die Rolle der energieintensiven Grundstoffproduktion zur Erreichung der Energie- und Klimaziele näher zu beleuchten. Es bildet die Technologiestruktur der Industrie ab und berechnet Energieverbrauch und Emissionen sowie Kosten auf Prozessebene. Eingangsdaten für die Modellierung sind übergreifende Aktivitätsgrößen wie die Wirtschaftsleistung je Branche und insbesondere die Produktionsentwicklung energieintensiver Grundstoffe, Energie- und CO₂-Preise, Annahmen zu Instrumenten, Strukturdaten wie Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie techno-ökonomische Daten der abgebildeten Technologien (siehe Abbildung 32). Die Struktur des Modells orientiert sich zum einen an der Struktur des Industriesektors, wobei möglichst homogene Bereiche zusammengefasst werden, und zum anderen an der Datenverfügbarkeit. Die folgenden Technologiebereiche werden unterschieden:

- **Energieintensive Prozesse** bilden die Struktur der energieintensiven Subsektoren auf Prozessebene ab – als Beispiel kann der Hochofenprozess bei der Stahlherstellung genannt werden. In diesem Modul wird die Diffusion von Effizienztechniken basierend auf ihrer Amortisationsdauer

simuliert. Annahmen und Methodik sind ausführlich in Fleiter et al. (2012; 2013) dargelegt. Der Wechsel auf neue CO₂-arme/-neutrale Prozessrouten wird in diesem Modul exogen festgelegt und orientiert sich u. a. an der Szenariodefinition, der technologischen Reife sowie den Kosten der alternativen Prozesse.

- **Elektromotorsysteme und Beleuchtung** finden Anwendung in sämtlichen Branchen und verschiedenen Prozessen: Elektromotoren werden z. B. sowohl in der Papierherstellung als auch in der Stahlherstellung eingesetzt. Beiden Technologiegruppen sind Einsparmaßnahmen zur Effizienzverbesserung zugeordnet, in der Regel in der Form neuer Technologien oder organisatorischer Maßnahmen.
- Der **Raumwärmebedarf** wird über Flächenkennwerte je Subsektor berechnet. Dies beruht auf einem Bestandsmodell, in dem die Kapitalumwälzung anhand der Altersstruktur modelliert wird. Es werden die beiden Bereiche Gebäudehülle und Heizungssystem unterschieden. Eine detaillierte Modellbeschreibung findet sich in Biere et al. (2014).
- Der **Wärmebedarf** in Industrieöfen findet vorwiegend im Temperaturniveau über 500 °C statt und beruht auf den Berechnungen des Prozessmoduls. In diesem Modul wird der Brennstoffwechsel je Subsektor simuliert, wobei Parameter wie die Energiepreise, der CO₂-Preis sowie die historischen Trends berücksichtigt werden (Rehfeldt et al. 2018).
- Warmwasser- und Dampferzeugung und -verteilung werden in einer Vielzahl von Prozessen, vor allem in der chemischen Industrie, dem Papier- und der Nahrungsmittelindustrie benötigt. Aufgrund der Ähnlichkeit der technischen Systeme wird die Dampferzeugung in FORECAST-Industry im Sinne einer Querschnittstechnik modelliert. Dabei wird sowohl ein Effizienzfortschritt bei den häufig schlecht gedämmten Dampfsystemen als auch eine Bestandsmodellierung der Dampferzeuger berücksichtigt. Der technische Wandel wird anhand von alternativen Wärmeerzeugern abgebildet, deren Einsatz mittels „discrete choice“-Methoden simuliert wird (Rehfeldt et al. 2019). Das Modell berücksichtigt über 20 einzelne Erzeugungstechniken inkl. Erdgaskessel, Dampfturbinen, GuD-Anlagen, Wärmepumpen und Elektrokessel.

Abbildung 32: Übersicht Modell FORECAST Industry



Quelle: eigene Darstellung

Für die Berechnung von **Dekarbonisierungsszenarien/-pfaden** kann eine große Bandbreite an unterschiedlichen Dekarbonisierungsstrategien berücksichtigt werden:

- **Steigerung der Energieeffizienz:** Hohe Auflösung bei Prozessen und umfassende Datenbank zu Einspartechniken erlaubt Bewertung des vorhandenen Effizienz-Potenzials und endogene Modellierung abhängig von Energie- und CO₂-Preisen.
- **Prozesswechsel auf CO₂-arme bzw. CO₂-neutrale Verfahren:** Hohe Auflösung bei Produktionsrouten und -Prozessen erlaubt technologiescharfe Modellierung des Wechsels auf neue Herstellungsverfahren je Produktionsroute. Neue Verfahren sind ggfs. auch mit dem Wechsel auf einen anderen Energieträger verbunden (z. B. Wasserstoff oder Strom).
- **Brennstoffwechsel:** Bestandsmodell der Dampferzeuger inkl. Discrete-choice-Modellierung der Investitionsentscheidung erlaubt endogene Simulation des Brennstoffwechsels entsprechend Wirtschaftlichkeit und Technologiebestand der verschiedenen Dampferzeuger. Ein vereinfachter Discrete-choice-Ansatz wird für die Modellierung des Brennstoffwechsels bei Industrieöfen verwendet (siehe Rehfeldt et al. 2018a). Dabei ist ein durch Preissignale motivierter Wechsel auf Biomasse, Strom (Elektrokessel, Wärmepumpen), Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe möglich.
- **CO₂-Abscheidung und Speicherung:** Hohe Prozessauflösung erlaubt Zuordnung von CCS zu ausgewählten Prozessen, z. B. um verbleibende prozessbedingte Emissionen in Produktionsrouten gezielt zu mindern.
- **Recycling und Materialeffizienz entlang der Wertschöpfungskette:** Große Anzahl berücksichtigter Produkte und separate Modellierung von Primär- und Sekundärrouten erlaubt je Szenario spezifische Annahmen zum Fortschritt bei Materialeffizienz und Kreislaufwirtschaft.

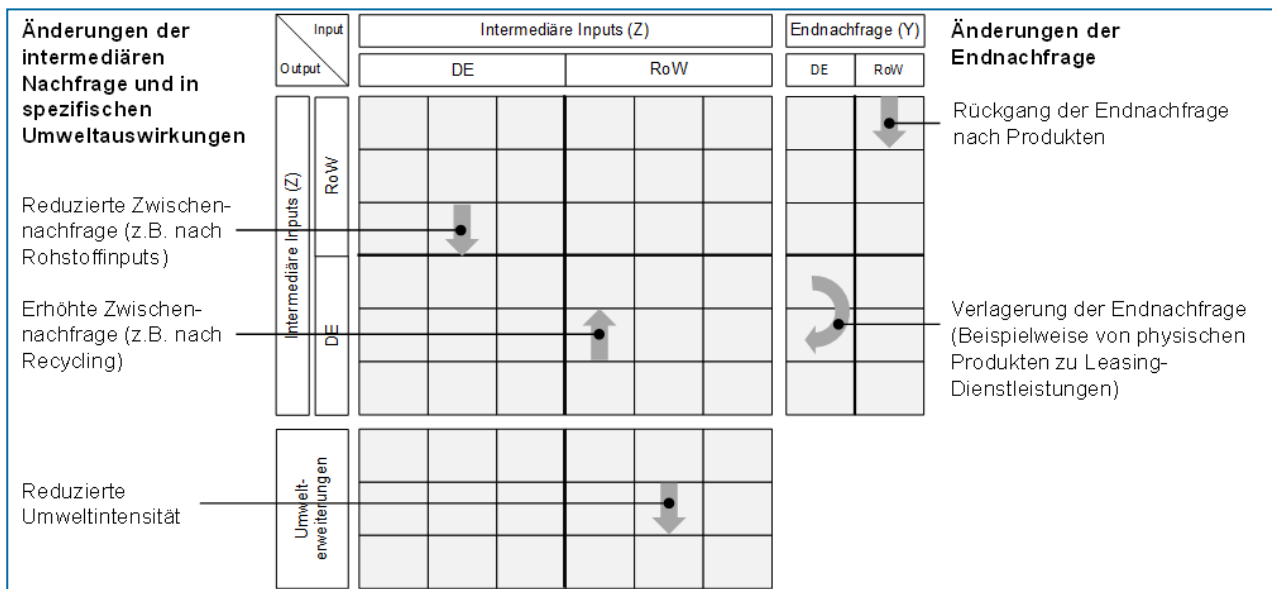
Zusammenfassend ergibt sich folgender Nutzen durch die Verwendung des Bottom-up-Energienachfragemodells in der Bewertung:

- Hoher Grad an technologischem Detail für die energieintensive Grundstoffproduktion
- Berücksichtigung aller wichtigen Energie- und CO₂-Vermeidungshebel
- Berücksichtigung der Auswirkungen von der CE-Maßnahmen durch Veränderung der nachgefragten Produktionsmengen, Anteile sekundärer Produktionsprozesse, Substitution, etc.
- Analyse der Auswirkungen von CE auf industrielle Endenergienachfrage und CO₂-Emissionen

3.6.1.4 Environmentally Extended Multiregional Input-Output (EE-MRIO) Modell

Der Ansatz des EE-MRIO ist bereits in Kapitel 2.2.1.1 ausführlich beschrieben.

Abbildung 33: Umsetzung von Circular Economy-Impulsen in EE-MRIO



Quelle: eigene Darstellung

Zusammenfassend ergibt sich folgender Nutzen durch die Verwendung von EE-MRIO in der Bewertung:

- Ganzheitliche Betrachtung globaler Wertschöpfungsketten
- Detaillierte Umwelterweiterungen mit Informationen zu Entnahmen aus und Emissionen in die Umwelt
- Berücksichtigung und Analyse vielfältiger Umwelteffekte der Endnachfrage (Entnahmen, Emissionen, Landinanspruchnahme...), Wertschöpfung, Beschäftigung

3.6.1.5 Makroökonomisches Simulationsmodell ISI-Macro

Das **makroökonomische Simulationsmodell ISI-Macro** ist in einer System Dynamics-Umgebung implementiert. Es stellt die Wirtschaft als Zusammenschluss individueller Subsysteme dar. Diese Subsysteme stehen in einem funktionalen Zusammenhang zueinander, wobei von einer gesamtwirtschaftlichen Kreislauflogik ausgegangen wird. Im Gegensatz zu neoklassischen Gleichgewichtsmodellen erfordert das Modell kein allgemeines Gleichgewicht der Märkte. Die Implementierung in System Dynamics erlaubt nichtlineare Effekte über die Interaktion verschiedener Feedback-Schleifen.

Das Modell besitzt einen makroökonomischen Kern, welcher vorrangig aus einem hochauflösenden Input-Output-Modul besteht. Dieses Modul entspricht den Konventionen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und stellt die Lieferbeziehungen (Vorleistungsmatrix) zwischen 72 Wirtschaftszweigen (WZ 2008) sowie von diesen an die Endnachfrage dar. Neben dem makroökonomischen Kern besitzt das Modell weitere Module, die unterschiedliche Teilbereiche der Wirtschaft abdecken. Dazu gehören u. a. das Investitionsmodul, das Beschäftigungsmodul und das Modul des öffentlichen Sektors sowie eine Schnittstelle zur Verarbeitung von Bottom-up-Impulsen.

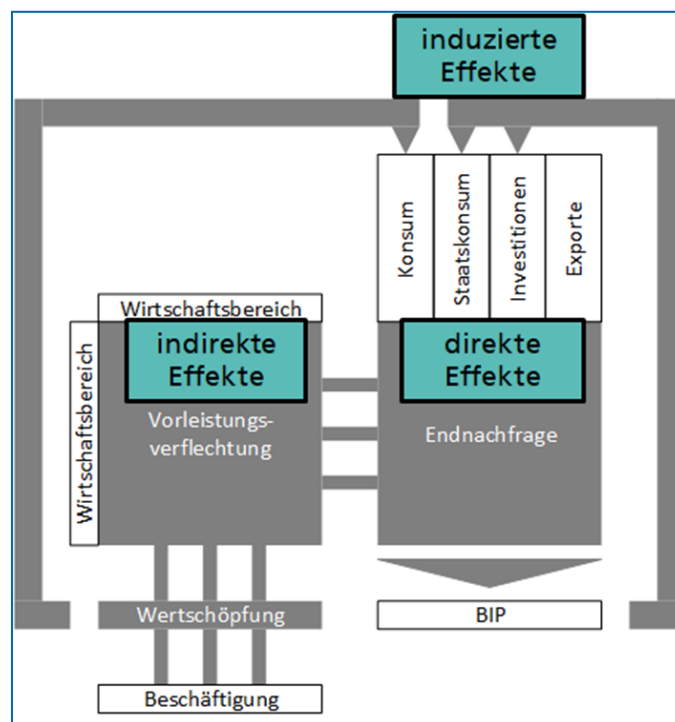
Im Rahmen der Circular Economy-Maßnahmen kann von den folgenden grundlegenden makroökonomischen Effekten ausgegangen werden:

1. Direkte Effekte

- a) in Sektoren, die Investitionsgüter im Bereich der Circular Economy bereitstellen, wie beispielsweise Recyclingtechnologien,
 - b) in Sektoren, die diese Technologien betreiben und warten,
 - c) in Sektoren, die Rohstoffe und Zwischenprodukte an andere Sektoren liefern.
2. Indirekte Effekte in allen Sektoren, die mit den direkt betroffenen Sektoren über die Gesamtwirtschaft verflochten sind

Beide Effekte treten in den einzelnen Wirtschaftszweigen in Form von veränderter Produktion und Wertschöpfung sowie im Konsum auf. Daraus resultieren wiederum Änderungen in der Beschäftigung. Durch die im Modell abgebildete Schließung von Einkommenskreisläufen können zudem induzierte Effekte abgebildet werden.

Abbildung 34: Darstellung der direkten, indirekten und induzierten Effekte in ISI-Macro



Quelle: eigene Darstellung

Der Input aus den Bottom-up-Maßnahmen erfolgt auf Ebene einzelner Wirtschaftsbereiche (die hier auch als Sektoren bezeichnet werden), z. B. über eine Veränderung der sektoralen Konsumausgaben der Haushalte bzw. der sektoralen Investitionsausgaben der Industrie (siehe Abbildung). Diese führen sowohl zu einer Änderung des BIP auf der Nachfrageseite als auch zur Anpassung des Endnachfragevektors der Input-Output-Tabelle. Zusammen mit den Veränderungen auf der intermediären Ebene der IO-Tabelle durch die Energiekostenänderungen der Industrie ergibt sich eine Veränderung der sektoralen Bruttowertschöpfung, wobei hier auch die sektoralen Outputänderungen zu berücksichtigen sind. Durch Verknüpfung der Bruttowertschöpfung mit den sektoralen Arbeitsproduktivitäten, die ggf. durch die Maßnahmen verändert werden, lässt sich die Beschäftigungswirkung der Klimaschutzmaßnahmen und -instrumente abschätzen. Aus der Veränderung des BIP kann die Wachstumswirkung berechnet werden.

3.6.1.6 Beispiel Biodiversität

Im **Bewertungsmodell** werden die einzelnen Modelle schwerpunktmäßig für die Fragestellungen eingesetzt, die ihren jeweiligen Stärken entsprechen. Durch die Implementierung von Schnittstellen wird ein **hybrides Modellsystem** geschaffen, welches dazu beiträgt, die Stärken der Modelle zu fördern und deren Schwächen zu überwinden. Zusätzlich dazu werden, basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Machbarkeitsstudie, entsprechende Modellerweiterungen vorgenommen bzw. ergänzende Analysen durchgeführt, um die Wirkung von Circular Economy-Maßnahmen entlang der definierten Zielkategorien (1) Biodiversität, (2) Klimaschutzziele, (3) Ressourcenschutz und (4) Sozioökonomische Wirkungen zu beleuchten.

Zum Beispiel können **Biodiversitätsverluste** im Rahmen des EE-MRIO-basierten Ansatzes nach einer von Wilting et al. (2017) vorgestellten Methodik approximiert werden. Das Projektteam hat in einem ersten Schritt Landnutzung und Klimawandel (induziert durch Treibhausgasemissionen) als die zwei Haupttreiber von Biodiversitätsverlust identifiziert. Diese lassen sich pro Land und Sektor bzw. pro Aktivität der privaten Haushalte (Siedlung und private Forstwirtschaft) mithilfe der EE-MRIO-Datenbank EXIOBASE berechnen. In einem weiteren Schritt werden Verlustfaktoren für den Indikator Mean Species Abundance (MSA) definiert. MSA drückt die mittlere Abundanz der ursprünglichen Arten in einer gestörten Situation im Verhältnis zu ihrer Häufigkeit in ungestörten Ökosystemen aus (Wilting et al. 2017, S. 3299). Bei der Bestimmung der Verlustfaktoren ist zu beachten, dass sich Landnutzung und Infrastruktur auf unterschiedliche Weise auf die Biodiversität auswirken (direkte Auswirkungen durch die Vernichtung von natürlichem Lebensraum und indirekte Auswirkungen wie Fragmentierung, Störung und Beeinträchtigung des verbleibenden natürlichen Lebensraums durch den Menschen). Dementsprechend müssen die Verlustfaktoren nach ihren Auswirkungen unterteilt und entsprechend den jeweiligen Sektoren und privaten Haushalten zugeordnet werden. Wilting et al. (2017) verwenden dazu Daten aus dem GLOBIO-Modell, die die örtlichen Gegebenheiten der Flächennutzung in den abgebildeten Ländern enthalten. Zudem werden weitere Datenquellen konsultiert, die im Einklang mit den Arbeiten des WWF zu Biodiversität sind.

Abbildung 35: Berechnungslogik des Biodiversitätsverlusts mithilfe von EXIOBASE



Quelle: eigene Darstellung basierend auf Wilting et al. (2017)

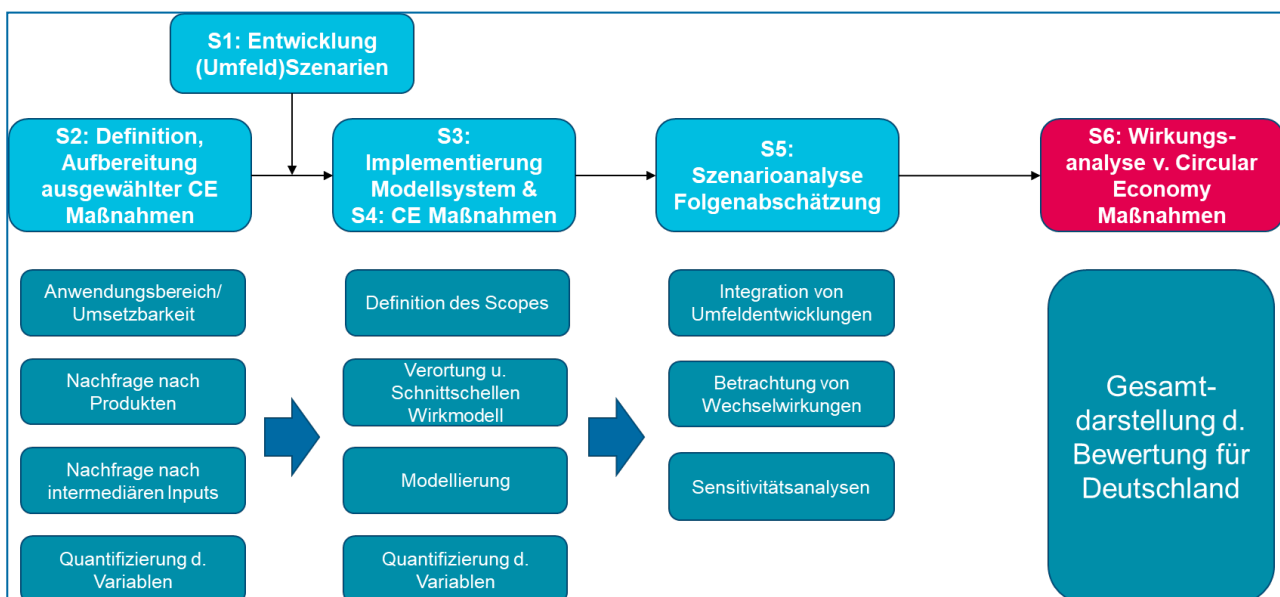
Die Ergebnisse zu Landnutzung und Treibhausgasmissionen aus EXIOBASE und die MSA-Verlustfaktoren können dann dazu verwendet werden, um Biodiversitätsverluste pro Land und Sektor bzw.

Aktivität der Haushalte zu berechnen. Hierbei ist es wichtig, zwischen auslösenden Ländern und Sektoren und betroffenen Regionen zu unterscheiden. Im Falle von Landnutzung ist die Zuweisung sowohl zu Auslösern (über die Nachfrage nach Endprodukten) als auch zu Betroffenen (Ort der Landnutzung) direkt möglich. Beim Klimawandel ist die Bestimmung der Auslöser und Emittenten von Treibhausgasemissionen ebenfalls direkt möglich, wohingegen betroffene Regionen nicht direkt ermittelt werden können. Hierfür ist es notwendig, den mittleren Temperaturanstieg pro Region basierend auf den berechneten Gesamttreibhausgasemissionen zu ermitteln. Zusammen mit der temperaturabhängigen Verlustrate der in jedem Land vorhandenen Spezies kann dann ihr Rückgang pro Land approximiert werden.

3.6.2 Vorgehen des Bewertungsmodells

Das Vorgehen des Bewertungsmodells besteht aus 6 Arbeitsschritten mit zugehörigen Meilensteinen (siehe Abbildung).

Abbildung 36: Vorgehen des Bewertungsmodells



Quelle: eigene Darstellung

3.6.2.1 Arbeitsschritt 1: Entwicklung von Umfeldszenarien

Im **ersten Arbeitsschritt (S1) "Entwicklung von Umfeldszenarien"** des Bewertungsmodells sollen eine beschränkte Anzahl an Szenarien für das definierte Zielsystem entwickelt werden. Ziel dieser Szenario-Entwicklung ist es aufzuzeigen, welche Bündel von Circular Economy- Maßnahmen unter Berücksichtigung der Änderungen zentraler Rahmenbedingungen, bis ins Jahr 2045 umgesetzt werden können. Dadurch sollen die potenziellen Chancen unterschiedlicher Entwicklungspfade hin zu einer Circular Economy im Vergleich zum Nicht-Handeln aufgezeigt werden.

Um dies zu gewährleisten, wird zwischen Baseline- und Circular Economy-Szenarien unterschieden. Das Baseline-Szenario repräsentiert die Entwicklung des Zielsystems gemäß heute abschätzbarer Trends und bereits geplanter Maßnahmen. Im Gegensatz dazu werden in Circular Economy-Szenarien jeweils zusätzlich begründete und in sich konsistente Bündel an Circular Economy-Maßnahmen umgesetzt. Der Auswahl der Maßnahmenbündel liegen Annahmen zu Grunde, wie sich die relevantesten Schlüsseltreiber für die Implementierung von Circular Economy-Maßnahmen bis ins

Jahr 2045 entwickeln können. Diese Schlüsseltreiber repräsentieren die bedeutendsten Rahmenbedingungen des Zielsystems, die einen entscheidenden Einfluss auf die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit von Circular Economy-Maßnahmen haben. Das bedeutet, dass unterschiedliche Entwicklungen der Schlüsseltreiber verschiedene Maßnahmenbündel plausibel und konsistent erscheinen lassen. Durch diese begründete Auswahl an Maßnahmen zeichnet jedes Circular Economy-Szenario einen möglichen Entwicklungspfad hin zu einer verstärkten Kreislaufwirtschaft nach. Durch den Vergleich mehrerer Circular Economy-Szenarien können verschiedene Entwicklungen der Rahmen-, bzw. Umfeldbedingungen und damit verbundenen Chancen und Unsicherheiten besser im Projekt berücksichtigt werden.

Die Szenarien sind generell qualitativer Natur. Sie stellen Narrative dar, die zeigen, wie die Entwicklungen entscheidender Schlüsseltreiber mit der Umsetzung von Circular Economy-Maßnahmen in Zusammenhang steht. Die Szenarien liefern dadurch eine plausible, konsistente Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungspfade. Die Erstellung dieser Szenarien erfolgt in den folgenden Arbeitsschritten:

- Im ersten Arbeitsschritt müssen die relevanten Schlüsseltreiber identifiziert und ausgewählt werden. Die Grundlage hierfür ist eine Reflektion über die bisher definierten Circular Economy-Maßnahmen und bestehender Modelle, im Zuge dessen relevante Faktoren gesammelt werden, die sich zur Definition unterschiedlicher Circular Economy-Maßnahmen eignen. Auf Basis dieser Grundlage werden in einem Workshop mit den Mitgliedern des Projektteams sowie in Abstimmung mit WWF, die relevantesten Schlüsseltreiber ausgewählt.
- Im zweiten Arbeitsschritt werden zuerst für alle ausgewählten Schlüsseltreiber mögliche Ausprägungen für das Jahr 2045 festgelegt. Die Ausprägungen zeigen, wie sich die Treiber bis dahin entwickelt haben könnten, wenn bestimmte Ereignisse eingetreten sind. Anschließend werden mehrere konsistente Kombinationen an Schlüsseltreiberausprägungen erstellt. Von diesen Kombinationen werden die zwei bis drei relevantesten ausgewählt. Die Aufgaben dieses Arbeitsschrittes werden ebenfalls im Rahmen eines partizipativen Workshops mit den Mitgliedern des Projektteams erledigt. Aus logistischen Gründen findet die Auswahl der Schlüsseltreiber aus Arbeitsschritt 1 und die Aufgaben aus Arbeitsschritt 2 in demselben ganztägigen Workshop statt. Die zwei bis drei ausgewählten Kombinationen von Schlüsselfaktorausprägungen liefern die Startpunkte für die weitere Entwicklungen der Szenarien.
- Im dritten Arbeitsschritt evaluieren die projektinternen Expert*innen der jeweiligen Sektoren die Passgenauigkeit der sektorspezifischen Maßnahmen für die ausgewählten Kombinationen an Schlüsseltreiberausprägungen. Im Zuge dessen machen sie begründete Vorschläge, welche Maßnahmen wie in welchem Circular Economy-Szenario zu berücksichtigen sind. Im Baseline-Szenario werden keine Circular Economy-Maßnahmen umgesetzt.
- Im letzten Arbeitsschritt werden dann die Ergebnisse der ersten drei Schritte in detaillierten Narrativen zusammengeführt. D.h. es werden für die ausgewählten Circular Economy-Szenarien die Zusammenhänge zwischen den Entwicklungen der Schlüsseltreiber und die Umsetzung der jeweiligen Circular Economy-Maßnahmen erklärt.

3.6.2.2 Arbeitsschritt 2: Bewertung und Aufbereitung von Circular Economy-Maßnahmen für die Modellierung

Arbeitsschritt 2 (S2) "Bewertung und Aufbereitung von Circular Economy-Maßnahmen für die Modellierung" soll die Erkenntnisse der Machbarkeitsstudie konsolidieren und diese durch zusätzliche Recherche und Stakeholder-Input ergänzen. Ziel ist es, die notwendige Datenbasis für die Systemmodellierung und sektoralen Fokusanalysen modellgerecht aufzubereiten. Im Rahmen dieser Aufbereitung können Factsheets zu ausgewählten Circular Economy-Maßnahmen erstellt werden.

Die erste Grundlage für die Factsheets liefert die Bewertung von im Rahmen der Machbarkeitsstudie identifizierten Circular Economy-Maßnahmen (siehe Kapitel 3.4). Diese enthalten neben qualitativen Maßnahmenbeschreibungen auch Informationen und Quantifizierungen zu den Effekten auf die Nachfrage der jeweiligen Produkte, der Fortpflanzung dieser Effekte in der Lieferkette sowie der Anwendbarkeit und Umsetzbarkeit der Maßnahme (exemplarisch siehe [Abbildung 38](#) und

Abbildung 39).

Des Weiteren werden die Maßnahmen auf ihre Eignung zur quantitativen oder qualitativen Analyse eingeordnet. Mögliche Kriterien hierfür können sein:

- Geeignete Bewertungsmethode;
- Anwendungsbereich (z. B. direkte/indirekte Auswirkungen, Branchenspezifität);
- Statische oder dynamische Modellierung;
- Aufwand und Fachwissen für die Umsetzung;
- Datengrundlagen (z. B. Verfügbarkeit und Qualität, insbesondere Anwendbarkeit auf zukünftige Szenarien; Sektorspezifität);
- Notwendiger qualitativer Ansatz (wo quantitative Analysen nicht möglich).

Teile dieser Informationen sind bereits im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie bereitgestellt und in diesem Arbeitsschritt, wo notwendig, erweitert und ergänzt.

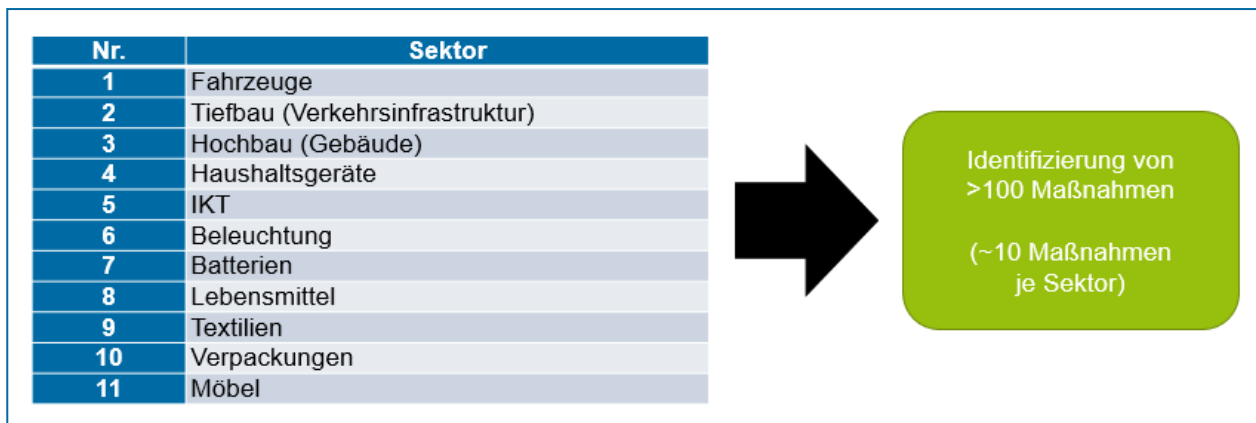
3.6.2.3 Arbeitsschritt 3: Implementierung des Modellsystems

Im **dritten Arbeitsschritt (S3) "Implementierung des Modellsystems"** soll die Implementierung des Bewertungsmodells durch die Entwicklung der Schnittstellenlogik zwischen den unterschiedlichen Modellen erfolgen. Dabei sollen die einzelnen Modelle schwerpunktmäßig für die Fragestellungen, die ihren jeweiligen Stärken entsprechen, eingesetzt werden. Wie zu Beginn des Abschnitts 3.6.1 beschrieben eignen sich die gezeigten Modelle besonders dafür, systematisch und integriert über verschiedene Sektoren sowohl kurzfristige als auch langfristige Entwicklungen in der Kreislaufwirtschaft abzubilden und zu analysieren. Unterschiede in den Modellen ergeben sich z. B. durch Merkmale wie Zeithorizont, Sektor- und Systemperspektive, Berücksichtigung der gesellschaftlichen Ebene oder Art der Lösungsfindung. Wie bereits zuvor ausgeführt sollen die einzelnen Modelle schwerpunktmäßig für die Fragestellungen, die ihren jeweiligen Stärken entsprechen, eingesetzt werden. Durch die Implementierung von Schnittstellen wird ein hybrides Modellsystem geschaffen, welches um ausgewählte Modellerweiterungen und weitere qualitative Analysen ergänzt werden kann, um die Wirkung von Circular Economy-Maßnahmen entlang der definierten Zielkategorien (1) Biodiversität, (2) Klimaschutzziele, (3) Ressourcenschutz und (4) Sozioökonomische Wirkungen zu beleuchten.

3.6.2.4 Arbeitsschritt 4: Implementierung der Circular Economy-Maßnahmen

Arbeitsschritt 4 (S4) "Implementierung der Circular Economy-Maßnahmen" soll die in der Machbarkeitsstudie identifizierten Maßnahmen im Wirkmodell verorten und deren Implementierung im Modellsystem adressieren. Dafür soll ein methodischer Ansatz (Produktperspektive, Materialperspektive, Gesamtperspektive) oder eine Kombination dieser Ansätze für die weitere Analyse der Auswirkungen der Circular Economy-Maßnahmen gewählt werden. Ausgehend von den Circular Economy-Maßnahmen in den identifizierten Schlüsselsektoren und der Bewertung der Maßnahmen für die Modellierung wird in diesem Arbeitsschritt deren Implementierung in das Modellsystem umgesetzt.

Abbildung 37: Sektorale Fokus des Bewertungsmodells



Quelle: eigene Darstellung

Das Bewertungsmodell unterscheidet dabei drei zentrale **Analyse-Kategorien**, wie auch unter 3.6.1 erläutert:

Detaillierte Produktbasierte Ansätze: Detaillierte Analysen produktbezogener Aspekte erlauben insbesondere, die Potenziale, die mit einer (produkt-)politisch stärker auf die effektive Umsetzung von R-Strategien einhergehen, mit einem umfassenden Set an Indikatoren zur Abbildung der potenziellen Umweltauswirkungen von Produkt- oder Prozessalternativen zu analysieren und zu bewerten.

Detaillierte materialbasierte Ansätze: wenn Circular Economy-Maßnahmen auf großvolumige Materialströme (wie Zement) abzielen, die in einer großen Anzahl von Produkten (verschiedene Arten von Gebäuden und Infrastruktur) enthalten sind. In solchen Fällen kann die Materialflussperspektive einer Vielzahl von einzelnen Ökobilanzergebnissen für generische Produktkategorien (Einfamilienhäuser, Bürogebäude usw.) vorzuziehen sein. Dabei werden Materialflussanalysen durchgeführt, um die Auswirkungen von Circular Economy-Maßnahmen in allen relevanten Stufen der Wertschöpfungskette zu erfassen, und anschließend mit der Bottom-up-Energienachfragesimulation FORECAST gekoppelt. Beispiele für die mögliche Anwendung der Methodik wären: der Bausektor mit besonderem Augenmerk auf Zement und Stahl; die Metallindustrie (Stahl, Aluminium, Kupfer) oder deren verarbeitende Industrien (z. B. Fahrzeugbau, Maschinenbau, Verpackung); die chemische Industrie (z. B. Grundchemikalien) und ihre Endanwendungen (z. B. Düngemittel, Kunststoffe).

Top-down-MRIO-basierte Ansätze: wenn nicht großvolumige Materialströme, sondern eine Vielzahl von Stoffen im betrachteten Sektor relevant sind. In MRIO-basierten Ansätzen werden diese vollständig erfasst und können entlang von Wertschöpfungsketten nachvollzogen werden. Sie spielen also eher eine Rolle, wenn heterogene Endprodukte von Circular Economy-Maßnahmen adressiert werden, beispielsweise Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik, die aus vielen Einzelkomponenten und entsprechenden Rohstoffen bestehen.

3.6.2.5 Arbeitsschritt 5: Szenarioanalyse zur Folgenabschätzung einer umfassenden Circular Economy in Deutschland

Die Szenarioanalyse zur Folgenabschätzung einer umfassenden Circular Economy in Deutschland erfolgt im **fünften Arbeitsschritt (S5) "Szenarioanalyse zur Folgenabschätzung einer umfassenden Circular Economy in Deutschland"** und nutzt für die Analyse eine sektorenübergreifende Perspektive, berücksichtigt aber dennoch mit hoher Auflösung die sektoralen Besonderheiten und Herausforderungen. Die Aufgabe ist die Koordination und Modellierung von Szenarien zu einer umfassenden Circular Economy in Deutschland. Die eigentlichen Szenario-Rechnungen erfolgen im engen Austausch mit den vorherigen Arbeitsschritten und in Anbindung an diese. Basierend auf den

in Arbeitsschritt 1 definierten Szenarien, den in Arbeitsschritt 2 erarbeiteten Maßnahmen und Datenbasis und dem in Arbeitsschritt 3 und 4 implementierten Methodenbaukasten bzw. Modellverbund sollen die Effekte der ausgewählten Circular Economy-Maßnahmen z. B. mit unterschiedlichen Ambitionsniveaus (hohe/mittlere Verbreitung von Circular Economy-Maßnahmen) und/oder Rahmenbedingungen (z. B. CO₂-Faktor für Strom) analysiert werden. Eine wichtige Rolle spielen dabei auch Rückkopplungen zwischen nachfragebasierten Änderungen und Änderungen der spezifischen Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung.

3.6.2.6 Arbeitsschritt 6: Zusammenführen der Ergebnisse und Wirkungsanalyse

In **Arbeitsschritt 6 (S6) "Zusammenführen der Ergebnisse und Wirkungsanalyse"** soll eine Analyse der Wirkungen der Transformationspfade bzw. Szenarien in Bezug auf mehrere Wirkungskategorien erfolgen: (1) Biodiversität, (2) Klimaschutzziele, (3) Ressourcenschutz und (4) Sozio-Ökonomie. Die Wirkungskategorien sind dabei keine direkten Modellergebnisse, sondern lassen sich erst aus der Synthese der Ergebnisse abschätzen. Wie beschrieben lassen sich Effekte auf die **Biodiversität** über verschiedene Proxy-Parameter abschätzen (siehe 3.3.1.3 und 3.6.1.6). Diese haben nicht immer die gleichen Effekte auf die Biodiversität, weshalb quantitative Ergebnisse durch qualitative Erkenntnisse zu den betroffenen Ökosystemen ergänzt werden müssen. Im Fall der **Klimaschutzziele** sind die Treibhausgasemissionsminderungen der Circular Economy-Maßnahmen ausschlaggebend für ihre Gesamtwirkung. Im Bereich des **Ressourcenschutzes** liegt der Fokus häufig auf biotischen und abiotischen Rohstoffen. Ähnlich zur Klimapolitik werden hier üblicherweise aggregierte Indikatoren wie die konsumbasierte Raw Material Consumption (RMC) ausgewiesen. Solche Indikatoren eignen sich grundsätzlich gut für grobe Aussagen zur Entwicklung des Rohstoffeinsatzes von Volkswirtschaften und somit zur Abschätzung der Ressourcenentnahme. Gegebenenfalls müssen aber weitere Indikatoren, wie z. B. zum Sekundärrohstoffeinsatz, ergänzt werden (siehe Abschnitt 3.3.1.2). Die vierte Wirkungskategorie der sozio-ökonomischen Faktoren beinhaltet daneben die **Versorgungssicherheit** mit Rohstoffen. Hier geht es um die kurz- bis mittelfristige Verfügbarkeit, die eher von wirtschaftlichen, politischen und technologischen Einflussgrößen bestimmt wird. Methodisch geht es hier also nicht um eine Kritikalitätsbewertung, sondern um eine Ausweisung von Verbesserungspotenzialen sowie um die Bewertung ihrer Relevanz nach der Kritikalitätsdimension. Weitere **sozioökonomische Effekte** werden ebenfalls in der Ergebnissynthese betrachtet (siehe 3.3.2). Hierzu gehören u. a. Veränderungen in der sektoralen Wertschöpfung und Beschäftigung. Dabei werden zusätzlich zu den Einzeleffekten auf Maßnahmen- und Sektorebene die sektorübergreifenden und gesamtwirtschaftlichen Effekte dargestellt, welche über die direkten Minderungs- und Anpassungseffekte von Circular Economy-Maßnahmen hinausgehen. Die Nettoeffekte der Circular Economy-Maßnahmen können so berechnet werden, einschließlich etwaiger makroökonomischer Rebound-Effekte, die sich u. a. aus Verschiebungen in den sektoralen Konsum- und Investitionsbudgets ergeben können.

Ein solch breites Spektrum von Zielen zu berücksichtigen ist essenziell, um die Akzeptanz der Circular Economy zu fördern, externe Kosten zu senken und die Erreichung der Versorgungssicherheit sowie von Klima- und Umweltzielen sicherzustellen. Es gilt also, die Umwelt, die öffentliche Gesundheit sowie Ressourcenverbräuche simultan zu betrachten. Der Fokus des Bewertungsmodells liegt dabei auf den zuvor identifizierten Sektoren/Anwendungen (Abbildung 10).

3.6.3 Beispielhafte Illustration

Beispielhaft ist nachfolgend der Fall der Maßnahme "Verwendung von Holz als Baumaterial in Gebäuden anstelle von mineralischen Materialien" dargestellt. Im Rahmen der Arbeitsschritte 2, 3 und

4 erfolgt zunächst die Definition und Charakterisierung der Maßnahme sowie die Ermittlung der relevanten quantitativen und qualitativen Information für die Einordnung und Implementierung im Bewertungsmodell (siehe [Abbildung 38](#) und

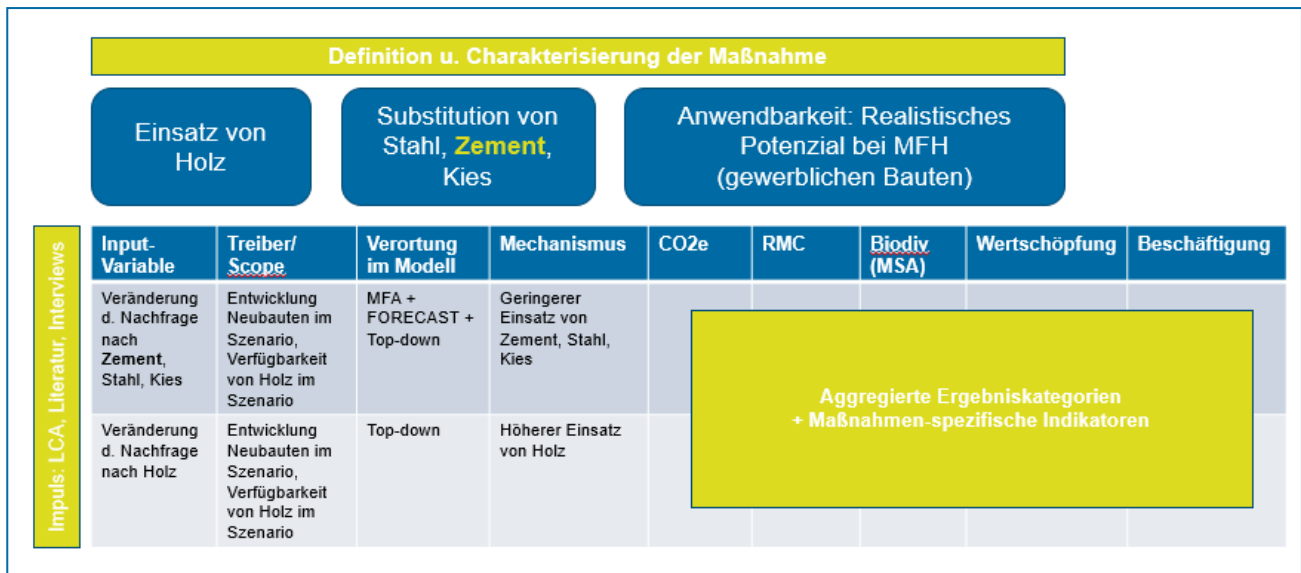
Abbildung 39).

Abbildung 38: Beispiel Fact-Sheet S2 “Bewertung und Aufbereitung von Circular Economy-Maßnahmen für die Modellierung”

Description		Using timber as the structural material in residential buildings instead of mineral materials (Above ground)			
Scope					
Sector	Cement & Steel	Activities	Cement and steel use in buildings	Reference product type	Cement and steel use in buildings
Baseline					
Reference situation	Business as usual concrete or steel building				
Current CE action trends	Market trend towards more use of wood for structural building elements, especially with the introduction of Cross Laminated Timber (CLT) which has similar load bearing assets as concrete elements. The CLT elements are gaining ground due to the quick building time and lightweight nature (compared to concrete) as well as long production times (due to high demand) for concrete elements in some countries.				
Impacts of the CE action					
	Description			Sources	
Activity levels	Norwegian based literature: Residential Building: Results show that the cross laminated timber building has 25% lower GHG emission compared to the concrete and steel building when looking at the production stage. A1-A3 emission of CLT building: 234 kg CO2e/m2 (60 year life span)			A. R. Eliassen, 2019.	
	German-based literature: Comparison of timber and mineral buildings (concrete) 35-56% reduction for single/two family houses 9-48% reduction for multi-story residential buildings			Hafner and Schäfer, 2017	
Influence of geographical differences on impact	The data used originates from Austrian and German timber vs. mineral-based residential buildings. LCA findings for residential buildings in other geographical contexts will likely differ, for instance based on the distance over which the timber material must be transported for manufacturing and construction, but also on the emission performance of mineral buildings.				
Rebound effect	The increase in use of wood for structural purposes/replacement of concrete/steel for buildings may have a negative impact on the forests (biodiversity etc.) if the sustainable forestry is not maintained and monitored. Potential risks include loss of biodiversity, erosion, loss of land, increase in CO2 emissions.				
Feasibility					
	Description				
Technical, economic and social feasibility	Numerous cases of wood buildings across Europe underlines the technical feasibility Studies show cost reduction of up to 21,7 % it is thus also economically feasible (Laguada-Mallo, 2016) Large geographical deviations in regulation regarding fire safety in the building industry which differentiates the number of floors for wooden buildings across Europe. In Denmark it is difficult to build more than 4 floors with wood due to a commonly used collection of examples. Norway and Austria already have buildings constructed by wood of up to 20 floors.				
Applicability of the CE action					
Applicable share of the types of products, materials or processes	All new residential buildings given that a minority will be at a height where steel and concrete will be necessary too.				

Quelle: Le Den et al. (2020)

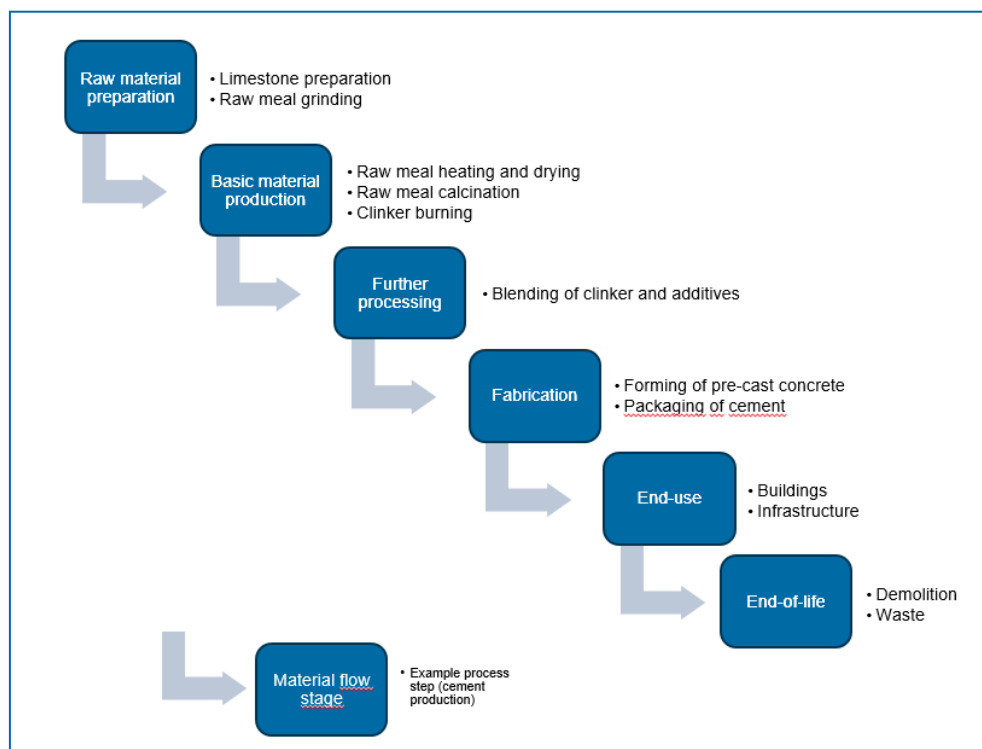
Abbildung 39: Vereinfachte schematische Darstellung der Verortung der Maßnahme im Bewertungsmodell



Quelle: eigene Darstellung

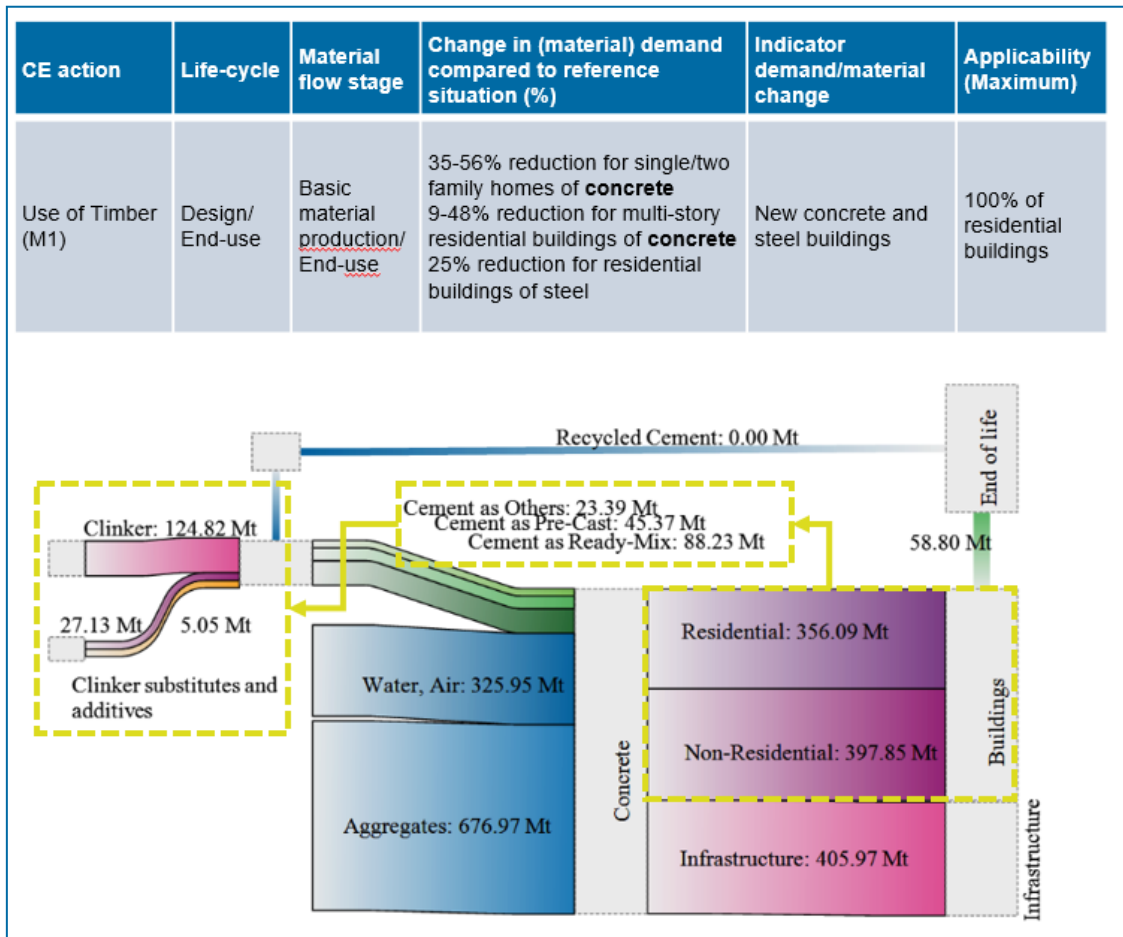
Die gezeigte Maßnahme adressiert einen **Bereich, der durch großvolumige Materialströme** gekennzeichnet ist. Als Folge wird zunächst eine **Materialflussanalyse** durchgeführt, um die Auswirkungen von Circular Economy-Maßnahmen auf Materialbedarf und Ressourcenverfügbarkeit in allen relevanten Stufen der Wertschöpfungskette in den unterschiedlichen Szenarien zu erfassen (siehe Abbildung 40).

Abbildung 40: Vereinfachte Darstellung der Wertschöpfungskette Zement



Quelle: eigene Darstellung

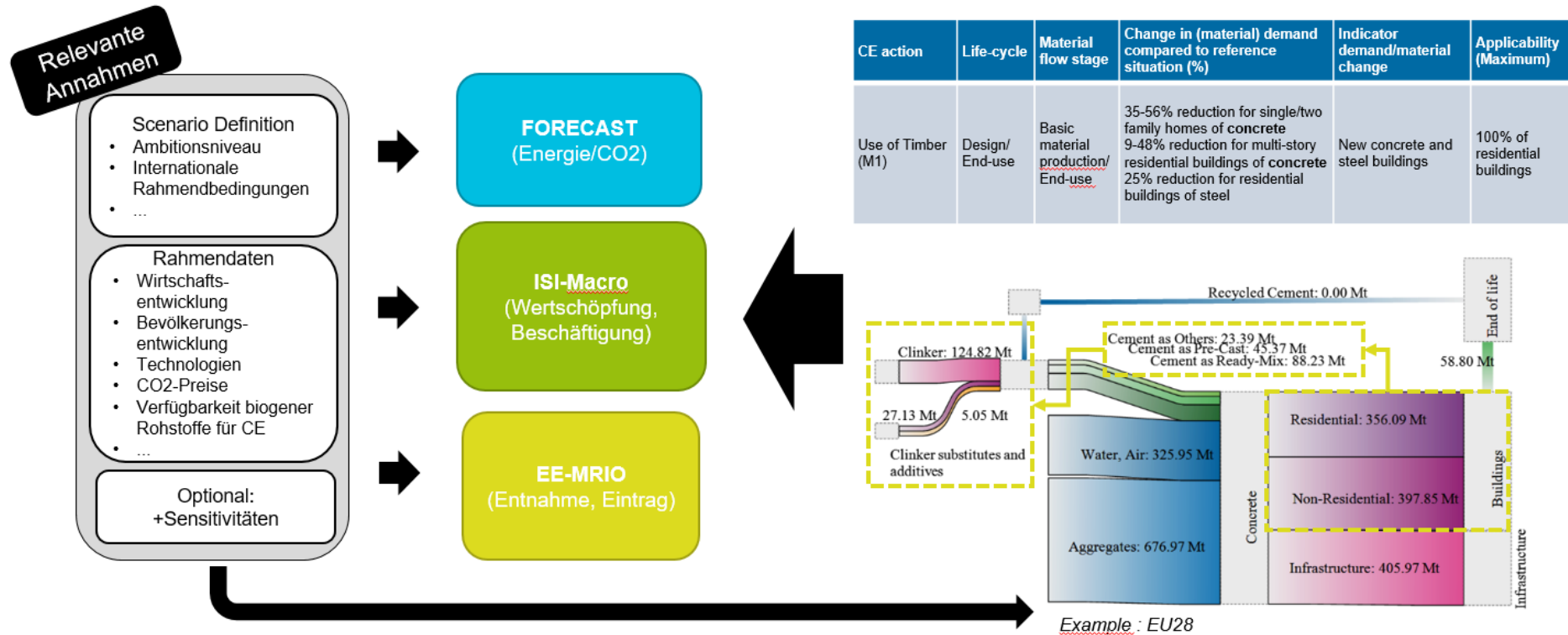
Abbildung 41: Quantifizierung des Maßnahmen-Impact im Rahmen der Materialflussanalyse



Quelle: eigene Darstellung

In den Arbeitsschritten 5 und 6 werden dann zugehörige Implikationen für den industriellen Energieverbrauch und CO₂-Emissionen durch die Schnittstelle mit dem Bottom-up-Energienachfragemodel FORECAST berücksichtigt, während sozio-ökonomische Implikationen auf Wertschöpfung und Beschäftigung durch die Schnittstelle zu ISI-Macro und umweltökonomische Implikationen durch die EE-MRIO Schnittstelle abgebildet werden (siehe Abbildung 42). Wichtige Voraussetzungen für die Analysen in Arbeitsschritt 5 und 6 sind dabei die Umfeldszenarien und die Szenario-Definitionen, welche in Arbeitsschritt 1 entwickelt werden, und wichtige Rahmendbedingungen wie z. B. Ambitionsniveau, Wirtschafts- u. Technologieentwicklungen, Außenhandel etc. vorgeben.

Abbildung 42: Schematische Darstellung der Szenario- und Wirkungsanalyse



Quelle: eigene Darstellung

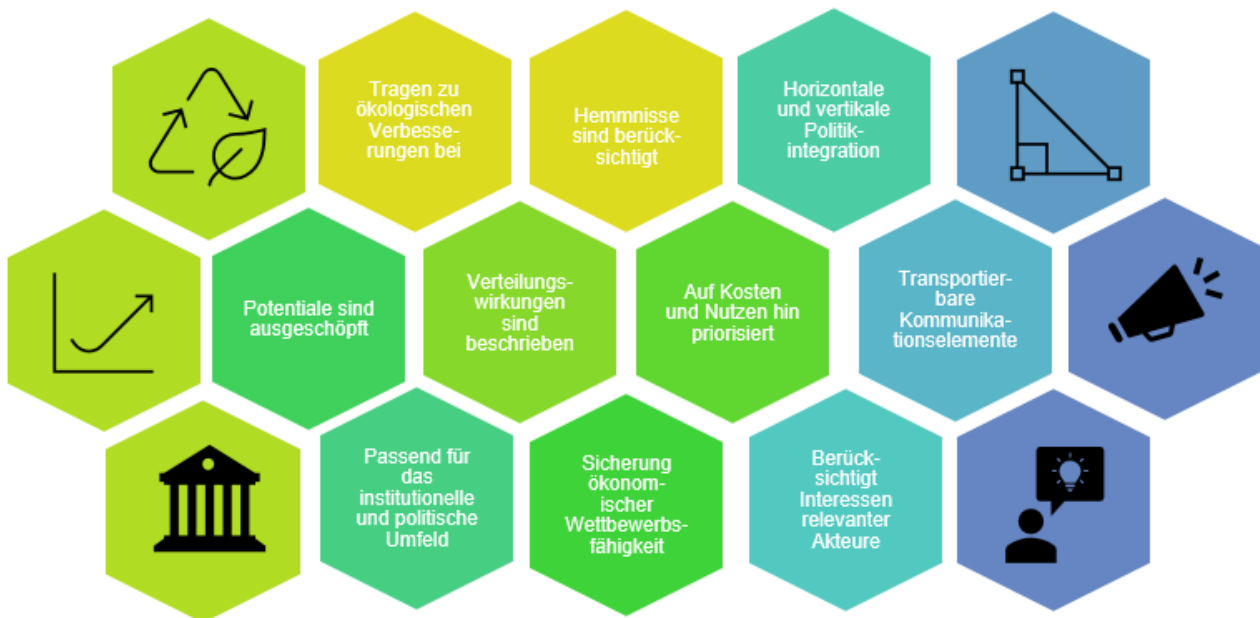
3.7 Erstellung und Berechnung einer Politik-Roadmap für eine Circular Economy in Deutschland

Zur Erstellung und Berechnung einer Politik-Roadmap für eine Circular Economy in Deutschland werden Politikinstrumente ausgearbeitet, bewertet und Bündel von Politikinstrumenten, sogenannte Policy Szenarien, mit kommunizierbaren Narrativen gebildet. Die politischen Instrumente werden aus einem breiten Pool von politischen Steuerungsoptionen (Schubert und Klein 2018) ausgewählt:

1. Instrumente der direkten staatlichen Regulierung durch Gesetze und Verordnungen,
2. Marktbasierte, ökonomisch und fiskalische Instrumente, z.B. Steuern und finanzielle Förderung, sowie
3. Sensibilisierungs- bzw. Informationsstrategien.

Nachvollziehbar begründete Ziele, politische Instrumente, Narrative und eine Struktur für die Governance bilden die zentralen Elemente der Politik-Roadmap. Instrumente und Narrative sind spezifisch, effektiv, relevant und realistisch gemäß der Charakterisierung in Abbildung 43. Die Roadmap ist ein Aktionsplan, der die Politikinstrumente zur Erreichung eines Zieles zeitlich aufeinander aufbauend und die für die Umsetzung erforderlichen Verantwortlichkeiten benennt.

Abbildung 43 Charakterisierung der Politikinstrumente und Narrative in der Roadmap



Quelle: eigene Darstellung

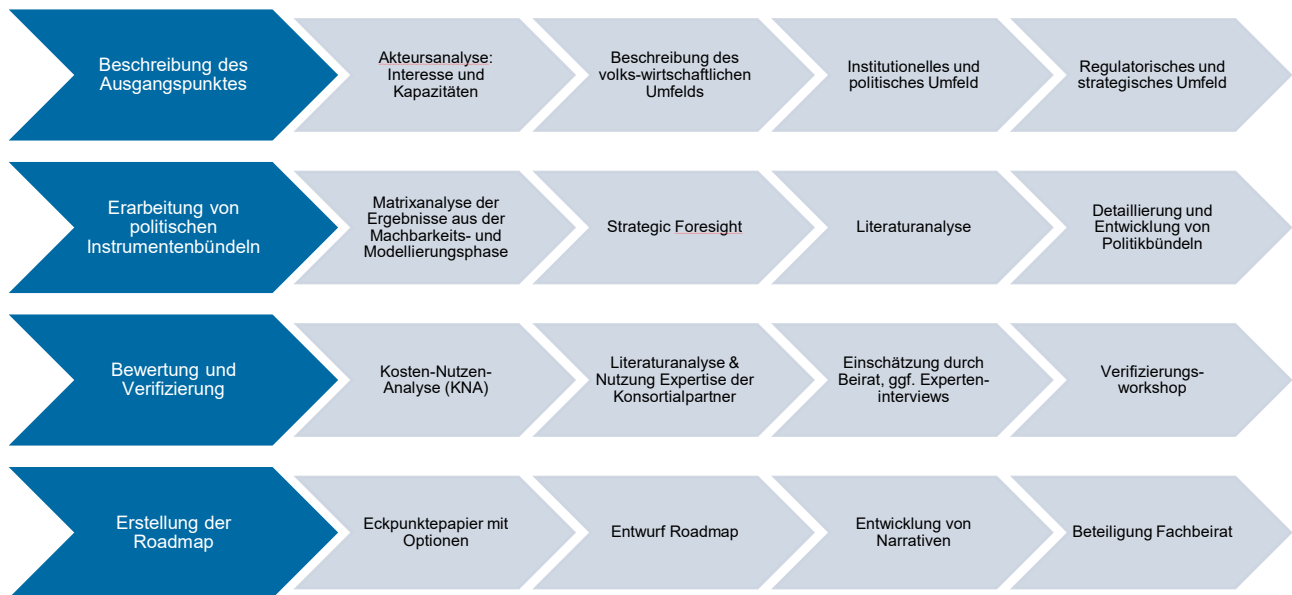
Die Politik-Roadmap wird mit transdisziplinärem Ansatz unter enger Begleitung eines strategischen Beirats erarbeitet.

Die Arbeit wird in vier aufeinander bauenden Arbeitsschritten geteilt (Abbildung 44):

1. Beschreibung des Ausgangspunkts,
2. Erarbeitung von möglichen politischen Instrumenten inkl. Festlegung von Ambitionsniveaus der Instrumente,
3. Bewertung der Instrumente und

4. Erstellung der Roadmap.

Abbildung 44: Darstellung des Arbeitsablaufs für die Erstellung der Politik-Roadmap



Quelle: eigene Darstellung

3.7.1 Beschreibung des Ausgangspunktes und eines Zielsystems

In einem ersten Schritt wird das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Zielsystem einer Circular Economy in Deutschland für die Strategieentwicklung aufgearbeitet. Hier werden auch Optionen für messbare und terminierte Ziele dargelegt und jeweils begründet.

Eine Strategie, die auf die Integration der Anliegen einer Ressourcenschonung in den verschiedenen Politikfeldern, Handlungsebenen und in Wirtschaft und Gesellschaft abzielt, muss sich mit den Rahmenbedingungen auseinandersetzen und insbesondere auch den Akteuren, ihren Handlungsmöglichkeiten und Orientierungen, um zu analysieren, wie sich diese zu den Zielen einer Circular Economy verhalten würden.

Die Umfeldanalyse knüpft erstens an die in der Modellierungsphase entwickelten qualitativen Umfeldszenarien an (siehe 3.6.2.1) und entwickelt diese für die Zwecke der Umfeldanalyse für eine Strategie weiter. Zweitens werden Diskurs- und Akteursanalysen der Ressourcenpolitik in Deutschland ausgewertet und fortgeschrieben. Insbesondere die vom Umweltbundesamt und Bundesumweltministerium beauftragten PolRess Studien können hier genutzt werden. An die Materialien werden insbesondere die folgenden Fragen gerichtet:

- Analyse der Akteure aus Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft im Hinblick auf ihre Interessen und Kapazitäten: **Wo stehen die als relevant identifizierten Akteure heute?**
- Beschreibung von für die Circular Economy relevante Elemente und Trends der Volkswirtschaft: **Was ist die volkswirtschaftliche Ausgangslage?**
- Beschreibung der für die Umsetzung einer Circular Economy relevanten politischen Strategien, Institutionen und ihre Zusammenarbeit: **Welche politischen Strategien und Institutionen müssen vernetzt werden?**

- Bestehende relevante Gesetzeslage und marktpolitische Ansätze, z.B. Subventionen: **Welche Instrumente steuern die Sektoren heute?**

Das Zielsystem soll so aufgearbeitet werden, dass es Teil der Roadmap werden kann.

3.7.2 Erarbeitung von politischen Instrumenten und Zusammenfassung in Maßnahmenbündel

Für die im Rahmen des Vorhabens identifizierten und bewerteten Circular Economy-Maßnahmen (siehe 3.4) werden politische Instrumente zusammengetragen, die in der Lage sind, die Hemmnisse wirksam zu adressieren und die Potentiale auszuschöpfen. Dafür wird zunächst eine umfassende Bestandsaufnahme möglicher Instrumente aus den folgenden Quellen zusammengetragen:

- **Matrixanalyse:** Die Circular Economy-Maßnahmen aus Arbeitspaketen 1 und 2 (Kapitel 3.4) werden mit den Handlungsstrategien der Circular Economy Definition (Kapitel 3.1) verschränkt. Eine Zuordnung der Sektor-bezogenen Maßnahmen zu den Strategien kann in Form einer Matrix erfolgen. In der Matrix können die politischen Instrumente entweder horizontal oder vertikal mehrere Circular Economy-Maßnahmen miteinander verknüpfen.
- **Auswertung Studien strategische Zukunftsforschung (Strategic Foresight²¹):** In der jüngeren Vergangenheit wurden mehrere Studien in Deutschland und der EU mit Methoden der Zukunftsforschung in dem Feld Circular Economy durchgeführt. Diese Methoden der Vorausschau werden in mehreren Schritten durchgeführt. Als Ziel der strategischen Vorausschau („präferierte Zukunft“) dient die in bereits entwickelte Circular Economy Definition (Kapitel 3.1). Dieser Methodencluster hält Optionen zur Strategieentwicklung zu Erreichung der präferierten Zukunft bereit (z.B. Trendanalysen, Systemanalyse, Horizon Scanning, Szenarienanalyse²²), die genutzt werden, um politische Instrumente abzuleiten. Die entsprechenden Studien werden hier ausgewertet.
- **Literaturanalyse:** Zusätzlich wird vorhandene Literatur im Hinblick auf die politischen Instrumente zu Implementierung einer Circular Economy untersucht.

Die Instrumente werden nach ihren hauptsächlichen Wirkungsmechanismen, den adressierten Hemmnissen, Materialflüssen, Produktgruppen und Sektoren beschrieben. Dies bildet eine Grundlage, um zu priorisieren und sinnvolle Instrumentenbündel zu definieren.

Priorisierte Instrumente werden detailliert beschrieben. Insbesondere die Literatur- und Diskursanalyse sowie das Wissen des Beirats dienen der **Festlegung von Ambitionsniveaus** für die jeweiligen Maßnahmen, wo immer möglich. Dies ist notwendig, damit die **Effektivität** der verschiedenen politischen Instrumente gewährleistet ist und diese bewertbar werden. Ambitionsniveau heißt im Zusammenhang mit

- regulatorischen Instrumenten - die Präzisierung des Gesetzes / der Verordnung;
- Quoten - das Festlegen der Raten bzw. eines Zielkorridors für die Rate, mit denen die Quote effektiv wirksam wird;
- finanziellen Förderungen - die Anforderungen für die Förderfähigkeit;
- Steuern - den Zielkorridor für die Höhe der Steuer;
- Sensibilisierungsmaßnahmen - die Zielgruppe sowie die Präzisierung der Maßnahme.

21 Klüfers et al. 2017.

22 Strategische Zukunftsforschung: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/strategische-zukunftsforschung>; Zugriff am 01.07.2022

Gleiches gilt für die Ansatzpunkte – wer ist von dem politischen Instrument betroffen – und Wirkmechanismen – auf welche Elemente hat das politische Instrument einen Einfluss. Es ist notwendig, die Instrumente **ausreichend genau zu beschreiben**, damit im nächsten Arbeitsschritt die Kosten und Nutzen richtig eingeschätzt werden können.

Die priorisierten und beschriebenen Instrumente werden zu Instrumentenbündeln zusammengefasst. Die Instrumentenbündel sollten alle Produktgruppen/Materialien umfassen, für die Circular Economy-Maßnahmen untersucht worden sind. Sie sollten variieren im Hinblick auf die Hemmnisse und Wirkungsmechanismen der Instrumente, sowie im Hinblick auf das Ambitionsniveau. Die Entwicklung der Instrumentenbündel ist ein iterativer Prozess, der auch im Zuge der Bewertung im folgenden Arbeitsschritt wiederholt werden kann. Letztlich soll ein Politikbündel entwickelt werden, der alle relevanten Hemmnisse wirksam adressiert und dafür ggf. auch unterschiedliche Wirkmechanismen nutzt.

Der **Output** dieses Arbeitsschrittes ist erstens eine Liste mit der Beschreibung von identifizierten Politikinstrumenten. Zweitens werden sinnvolle Bündel entwickelt, die dann im folgenden Arbeitsschritt bewertet werden.

3.7.3 Bewertung (Kosten-Nutzen-Analyse) und Verifizierung mit dem strategischen Beirat sowie Stakeholdern

In diesem Arbeitsschritt erfolgt die Bewertung im Hinblick auf Kosten und Nutzen unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen auf identifizierte Stakeholdergruppen, für die Sektoren und für Deutschland im Allgemeinen. Es wird die Methode einer der Kosten-Nutzen-Analyse gewählt, da dieser Methode inhärent ist, eine substantielle ökologische Verbesserung (Nutzen) der Wettbewerbsfähigkeit (Kosten) gegenüberzustellen. Die Methode wird im Sinne einer umfassenden Bewertung der Vor- und Nachteile genutzt und integriert auch qualitative Aspekte. So sollten beispielsweise auch ethische Aspekte von Verteilungswirkungen Berücksichtigung finden, die sich kaum monetarisieren lassen.

Die Kosten-Nutzen-Analyse wird auf die Politikbündel angewendet und greift dabei auf Erkenntnisse zu Bewertungen von Policy-Mixes einerseits und die Praxis von Impact Assessments auf der europäischen Ebene auf²³.

Eine Kosten-Nutzen-Analyse ist ein Verfahren zur vergleichenden Bewertung von Handlungsalternativen im Hinblick auf **ökologische, ökonomische, soziale Wirkungen und deren Verteilung**. Relevanten Wirkungen werden vertieft untersucht, wo möglich quantifiziert und gegenübergestellt. Ökologische Wirkungen sollen mithilfe des im Rahmen des Vorhabens entwickelten Bewertungsmodells abgeschätzt werden können (siehe 3.6.1), relevante Wirkungskategorien sind in der vorliegenden Machbarkeitsstudie identifiziert worden (siehe 3.3.1).

Bei der Beurteilung von ökonomischen Wirkungen soll insbesondere auch auf Fragen der Standort-sicherung, Wettbewerbsfähigkeit, zukunftssicherer Industrien und der Rohstoffsicherung für Deutschland eingegangen werden. Soziale Auswirkungen sind beispielsweise die Zunahme/der Rückgang von (formeller) Beschäftigung, die Gesundheit von Arbeitern/Angestellten oder Auswirkungen auf die Verbraucher und Verbraucherinnen, z.B. Preise.

Ein spezifisches politisches Instrument muss sich nicht in allen drei Bereichen (ökonomisch, ökologisch, sozial) auswirken, zudem können jeweils verschiedene Wirkungskategorien relevant sein,

²³ Impact Assessment: https://single-market-economy.ec.europa.eu/about-us/chief-economist-team/impact-assessment_en; Zugriff am 01.07.2022

z.B. kein Beitrag zur Gesundheit von Arbeitnehmer*innen aber auf die Anzahl der Jobs. Solche Analysen werden im Prozess der Entwicklung neuer Gesetzestexte bei der Europäischen Kommission eingesetzt, wie z.B. im Bereich der Altfahrzeugrichtlinie, der Gesetzgebung zu Schadstoffen in Elektronikgeräten (RoHS), Batterieregulierung oder Ökodesign-Richtlinie. Eine solche Detailbetrachtung und Analysen werden zwar im Rahmen des hier vorliegenden Vorhabens nicht möglich sein, könnte aber eine erste Orientierung in ausgewählten Sektoren und Produktgruppen liefern.

Die Kosten-Nutzen-Analyse wird folgende Elemente nutzen:

- Literaturanalysen, z.B. sogenannte *impact assessment studies*,
- Konsultation des strategischen Beirats, der speziell für die Begleitung des Vorhabens und Entwicklung der Politik-Roadmap ins Leben gerufen wird, sowie
- weitere Expertinnen und Experten, wenn nötig, in Form von leitfadengestützten Interviews.

Ein zusammenfassendes Fazit von Kosten und Nutzen wird im Rahmen des nächsten Arbeitsschrittes in Bezug auf die dort gebildeten Instrumenten-Bündel erstellt.

3.7.4 Erarbeitung der Roadmap und Unterstützung ihrer Kommunikation

Die Roadmap integriert die Analysen aus den vorgängigen Arbeitsschritten sowie aus der Modellierungsphase. Die Strategie gibt insbesondere Antworten auf die folgenden Fragen:

- Handlungsbedarfe und Ziele Circular Economy: Was soll erreicht werden? Warum wurde das bisher noch nicht erreicht, warum muss sich etwas ändern? Welche Potentiale sind damit verbunden? Welche Hemmnisse?
- Akteure und Adressaten der Roadmap: Wer muss was tun, um die Ziele zu erreichen, Hemmnisse zu adressieren und Potentiale auszuschöpfen? Insbesondere. Welche rahmensetzenden Akteure spielen hier welche Rolle?
- Instrumente einer Roadmap: Welche politischen Instrumente können und sollten genutzt werden, um die Rahmenbedingungen so zu verändern, dass eine Circular Economy realisiert werden kann? Welche Vor- und Nachteile sind damit jeweils verbunden? Wer ist für die Umsetzung verantwortlich und wie bauen die Instrumente aufeinander auf?
- Governance der Roadmap: Wer sollte für die Roadmap Verantwortung übernehmen, wie können Konflikte ausgetragen werden, wer sollte wie beteiligt werden? Wie kann die Integration in die Politikfelder und über die Ebenen hinweg gesichert werden? Wie kann die Wirksamkeit beobachtet und sichergestellt werden?

Die Roadmap wird in einem mehrstufigen Verfahren erarbeitet:

- In einem ersten Schritt werden Eckpunkte für die o.g. vier Aspekte mit jeweils unterschiedlichen Optionen skizziert. Die Optionen werden deutlich voneinander abgegrenzt, um eine fundierte Diskussion mit dem strategischen Beirat und weiteren Stakeholdern zu ermöglichen.
- In einem zweiten Schritt werden die Optionen weiter geschärft und ausformuliert, ggf. unterschiedliche Optionen miteinander kombiniert. Das Ergebnis stellt den ersten Entwurf einer Roadmap dar. Für diesen Entwurf werden wiederum Rückmeldungen vom strategischen Beirat und weiteren Stakeholdern eingeholt.

- In einem dritten Schritt werden Kommunikationselemente erarbeitet. Der Gegenstand sollten Narrative für eine Circular Economy sein. Narrative werden verstanden als wert- und emotionsgeladene Erzählungen zur Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit einer Circular Economy. Sie sind angepasst an die Bedürfnisse und Handlungsmöglichkeiten der Adressaten. Sie sind die Grundlage für öffentliche Kommunikation und Kampagnen. Auch hier werden unterschiedliche Optionen erarbeitet und mit dem strategischen Fachbeirat diskutiert. Die Ergebnisse aus der Konsultation werden bei der abschließenden Ausarbeitung von Narrativen berücksichtigt.

Die Roadmap soll für eine umfassende Kommunikation geeignet und als ein eigenständiges Dokument abrufbar sein.

4 Diskussion und Ausblick für die Modellierung von Circular Economy

Ein zentraler Vorteil des vorgeschlagenen Bewertungsmodells ist seine methodische Breite und Problemorientierung. Während ein möglichst umfassendes und zugleich konkretes Bild einer Circular Economy in Deutschland gezeichnet werden soll, liegt ein weiteres Ziel in der möglichst genauen Abschätzung der relevanten ökologischen und sozio-ökonomischen Folgen von politischen Instrumenten, die die Circular Economy in Deutschland fördern. Allerdings müssen diese beiden Ziele ausgewogen verfolgt werden, da eine umfassende Betrachtung nicht im gleichen Detailgrad wie eine Einzelbetrachtung stattfinden kann. Zu dieser ausgewogenen Herangehensweise gehört, dass die Maßnahmen zur Förderung der Circular Economy in Deutschland zuerst realistisch definiert und bestmöglich in ihren Folgen quantifiziert werden. Dies beinhaltet nicht nur technische, sondern auch sozio-ökonomische Aspekte. Beispielsweise zeigen technische Verbesserungen von Produkten keine Wirkung auf ihre Nutzungsdauer, wenn die Nutzer*innen nicht bereit sind, Geräte tatsächlich länger zu nutzen. In diesem Zusammenhang wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudie über 100 Maßnahmen in elf Sektoren auch im Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit ausgewertet. Die Bewertung, die teilweise nur mit qualitativen Einschätzungen möglich war, vermittelt dennoch ein gutes Bild über die potenziellen Herausforderungen wie Datenverfügbarkeit, Zielkonflikte, marktstrukturelle Voraussetzungen, Verbraucherakzeptanz usw. Die einzelnen Circular Economy-Maßnahmen müssen in einem weiteren Modellierungsschritt korrekt für die verwendeten Modelle parametrisiert werden, um ihre Folgen abschätzen zu können. Hierbei werden auch Umfeldentwicklungen (also die Bedingungen der jeweiligen Maßnahmen) und vielfältige Wechselwirkungen zwischen Circular Economy-Maßnahmen beachtet.

Konkret bedeutet dies, dass über 100 Maßnahmen innerhalb der elf Sektoren in eigenen Wirkmodellen (die sich zwischen Sektoren ggfs. überschneiden) so definiert werden müssen, dass klar hervorgeht, welche Inputparameter für die Bestimmung ihrer ökologischen und sozio-ökonomischen Folgen notwendig sind und welche Wechselwirkungen mit anderen Maßnahmen bestehen, die diese Folgen beeinflussen können. Zudem ist die Frage zu beantworten, welche dieser Parameter stark von Umfeldentwicklungen beeinflusst werden und welche vorrangig von den Maßnahmen selbst betroffen sind. Entsprechend sind die prospektiven Szenarien in Abstimmung mit der Auswahl der Maßnahmen zu definieren.

Herausforderungen bestehen insbesondere bei den folgenden Aspekten:

- Quantifizierung und Skalierung (auf deutschlandweite Ebene) einzelner Effekte: z. B. welcher Anteil aller Haushaltsgeräte eignet sich beispielsweise für eine Lebensdauerverlängerung? Wie groß ist die Verlängerung im Durchschnitt? Welchen Nachfragerückgang für Neugeräte bedingt sie? Hier werden teilweise Datenlücken durch plausible Annahmen geschlossen werden müssen, die aber auch transparent ausgewiesen werden.
- Bestimmung und Quantifizierung relevanter Wechselwirkungen innerhalb einer Maßnahme und Zieldimension: z. B. welche Rohstoffimplikationen hat eine technisch bedingte Lebensdauerverlängerung, die der Nachfragereduktion nach Neugeräten entgegenwirkt? Welchen Rohstoffbedarf haben etwaig notwendige Reparaturdienstleistungen im Vergleich zur Nachfragereduktion?
- Bestimmung und Quantifizierung relevanter Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen und Zieldimensionen: z. B. führen Lebensdauerverlängerungen zu Verschiebungen der Wertschöpfung zwischen Sektoren, die Auswirkungen auf Rohstoff- und Energienachfrage haben? Führen Einsparungen an einer Stelle zu Ausgaben an anderen Stellen? In welchem Umfang können Induktions- und Reboundeffekte die erwünschten positiven Effekte schmälern?

- Adäquate Abbildung relevanter Umfeldentwicklungen innerhalb der Szenarien: Welche technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen sind wahrscheinlich und wie beeinflussen sie die Effekte der Maßnahmen?

Mithilfe des im Rahmen der Machbarkeitsstudie empfohlenen hybriden Ansatzes können die wichtigsten ökologischen und sozio-ökonomischen Einzeleffekte der jeweiligen Maßnahmen präzise abgebildet und Wechselwirkungen innerhalb einzelner Zieldimensionen zu einem großen Teil dargestellt werden. Wechselwirkungen zwischen Zieldimensionen sind hingegen schwerer abzubilden und müssen in iterativen Verfahren abgeschätzt werden. Es gibt beispielsweise kaum empirische Hinweise darauf, wie Unternehmen mit den Ersparnissen aus einer Reduktion der Materialintensität ihrer Produkte umgehen. In solchen Fällen müssen plausible Annahmen getroffen und zusätzliche qualitative Analysen durchgeführt werden, die die Modellrechnungen unterstützen.

Die Prüfung der Plausibilität der Annahmen ist nicht nur für in Betracht gezogene Wechselwirkungen innerhalb und zwischen Zieldimensionen notwendig, sondern für alle Bereiche der Modellierung. Beispielsweise bedarf es ebenfalls einer Validierung der Definition der Maßnahmen, der Methodenwahl, der Bestimmung der Inputparameter zu Referenzprodukten und Alternativen, sowie der Auswahl relevanter Umfeldentwicklungen. Während diese in unterschiedlicher Weise bedacht und mithilfe des vorgeschlagenen hybrides Bewertungsmodells auch quantitativ implementiert werden können, bieten die Modellierungsannahmen immer gewisse Diskussionsspielräume und Anlass zu Kritik.

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass die Umsetzung der Modellierung nicht nur weitere Expert*innen und Stakeholder bei der Festlegung von Annahmen und Modellierungsparametern einbezieht, sondern auch möglichst hohe Transparenz bei der Dokumentation der Annahmen und verwendeten Daten gewährleistet. Ferner kann mit Sensitivitätsanalysen untersucht werden, inwiefern Abschätzungen und Annahmen die Ergebnisse der ermittelten Folgen beeinflussen. Insgesamt besteht Konsens darüber, dass es unrealistisch ist, die Komplexität einer ganzheitlichen Circular Economy in Deutschland in einem Modell vollumfänglich abzubilden. Wichtig ist die Nachvollziehbarkeit der Modellierungsparameter und der unterstellten Wirkungszusammenhänge, vor allem wenn sie die Grundlage für die Entwicklung einer Politik-Roadmap liefern sollen.

Zusammenfassend kann auf der Grundlage der Ergebnisse der vorliegenden Machbarkeitsstudie der Schluss gezogen werden, dass das Modell Deutschland Circular Economy grundsätzlich im Sinne der vom WWF verfolgten Zielsetzung umsetzbar, wenngleich anspruchsvoll ist und einiger Voraussetzungen bedarf. Es konnte gezeigt werden, dass die Verbindung der Sektor-, der Produkt- und der Materialperspektive zwar komplex, aber anhand des hybriden Modellansatzes machbar ist. Daneben wurden aus elf Sektoren Maßnahmen zusammengetragen, die dazu geeignet sind, die Circular Economy in Deutschland effektiv zu fördern, und deren Auswirkungen durch Bündelung einzelner Maßnahmen zu konsistenten und kohärenten Szenarien in ihren ökologischen und ökonomischen Auswirkungen quantitativ abzubilden. Zu den hier relevanten Kenngrößen wurde in dieser Vorstudie ein Vorschlag erarbeitet.

Literaturverzeichnis

- Abderrahim, A.; Monnet, A. (2018): Report on major trends affecting future demand for critical raw materials. Deliverable 2.2 of the SCRREEN project funded through the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 730227.
- Biere, David; Fleiter, Tobias; Hirzel, Simon; Sontag, Benjamin (2014): Industry - more than just processes. A combined stock-model approach to quantify the energy saving potential for space heating in European industry. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-294612.html>, zuletzt geprüft am 15.07.2022.
- BMUV (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-iii-2020-bis-2023>, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Bobba, S.; Carrara, S.; Huisman, J.; Mathieux, F.; Pavel, C. (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study. Hg. v. European Commission (JRC).
- Brandt, M. (2022): Es muss nicht immer Fast Fashion sein. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/infografik/27355/umfrage-zum-kauf-von-secondhand-produkten/>, zuletzt geprüft am 19.07.2022.
- Bringezu, Stefan; Schütz, Helmut (2014): Indikatoren und Ziele zur Steigerung der Ressourcenproduktivität. Berlin. Online verfügbar unter http://edocs.fu-berlin.de/docs/servlets/MCRFileNodeServlet/FUDOCs_derivate_000000003399/PolRessxAP1_IndikatorenxundxZielelexzurxSteigerungxderxRessourcenproduktivitxt_WI.pdf.
- Buchert, Matthias; Bulach, Winfried; Degreif, Stefanie; Hermann, Andreas; Hünecke, Katja; Mottschall, Moritz et al. (2017): Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft. Hg. v. Öko-Institut e.V. Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Abschlussbericht_D2049.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2019.
- Circle Economy (2022): The Circularity Gap Report 2022. pp. 1-64, Rep. Hg. v. Circle Economy. Amsterdam. Online verfügbar unter <https://www.circularity-gap.world/2022#Download-the-report>, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Circular Economy Initiative Deutschland; SYSTEMIQ; Acatech (Hg.) (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/>, zuletzt geprüft am 25.04.2022.
- Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Auberger, A.; Kämper, C. et al. (2020a): Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekoress-ii>.
- Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Kemper, L.; Auberger, A. et al. (2020b): Environmental Criticality of Raw Materials. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials>.
- EEA (2000): Environmental signals 2000 - Environmental assessment report No 6. Online verfügbar unter <https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-205-X>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- Ellen MacArthur Foundation (2012): Towards the Circular Economy Vol. 1. An economic and business rationale for an accelerated transition. Online verfügbar unter <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an-accelerated-transition>, zuletzt geprüft am 10.01.2020.
- Europäische Kommission (2020): Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The

- Regions - A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0017.02/DOC_1&format=PDF.
- European Commission (Hg.) (2020): A new Circular Economy Action Plan. COM(2020) 98 final.
- European Commission (DG DROW) (Hg.) (2017a): Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets. Deloitte Sustainability.; British Geological Survey; Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- European Commission (DG DROW) (Hg.) (2017b): Study on the review of the list of critical raw materials. final report. Deloitte Sustainability.; British Geological Survey; Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- Fleiter, T.; Schlomann, B.; Eichhammer, W. (Hg.) (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien. Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag (ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale"). Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-234719.html>.
- Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea; Elsland, Rainer; Klingler, Anna-Lena; Manz, Pia; Eidelloth, Stefan (2018): A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. In: *Energy Strategy Reviews* 22, S. 237–254. DOI: 10.1016/j.esr.2018.09.005.
- Herbst, A. (2017): Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem „bottom-up“ Energienachfrage-Modell für die Industrie. Dissertation, Flensburg. Online verfügbar unter <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/a1722f21-b77a-4fc0-8353-18948e1b1fa6/details>, zuletzt geprüft am 19.07.2022.
- Hirschnitz-Garbers, Martin; Werland, Stefan (2017): Ressourcenpolitik und planetare Grenzen. Online verfügbar unter https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/22042/Hirschnitz-Garbers_Werlandx2017_Vertiefungsanalyse_planetarexGrenzen.pdf?sequence=1&isAlloved=y.
- Hünecke, K.; Heyen, D. A.; Ostertag, K. (2022): Strukturwandel zu einer Green Economy. Screening besonders betroffener Branchen. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strukturwandel-zu-einer-green-economy>, zuletzt geprüft am 15.07.2022.
- ILO Office (2009): Guide to the new Millennium Development Goals Employment Indicators including the full set of Decent Work Indicators. Geneva. Online verfügbar unter http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_emp/documents/publication/wcms_110511.pdf.
- International Resource Panel (2019): Global Resources Outlook 2019. Natural Resources for the Future We Want. Unter Mitarbeit von Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., Clement, J., and Cabernard, L., Che, N., Chen, D., Droz-Georget, H., Ekins, P., Fischer-Kowalski, M., Flörke, M., Frank, S., Froemelt, A., Geschke, A., Haupt, M., Havlik, P., Hüfner, R., Lenzen, M., Lieber, M., Liu, B., Lu, Y., Lutter, S., Mehr, J., Miatto, A., Newth, D.,

- Oberschelp, C., Obersteiner, M., Pfister, S., Piccoli, E., Schaldach, R., Schüngel, J., Sonderegger, T., Sudheshwar, A., Tanikawa, H., van der Voet, E., Walker, C., West, J., Wang, Z., Zhu, B. Hg. v. United Nations Environment Program (UNEP) (ISBN: 978-92-807-3741-7).
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Unter Mitarbeit von Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.) (.). Hg. v. Cambridge University Press. In Press. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- IRP (2020): Resource Efficiency and Climate Change. Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Unter Mitarbeit von E. Hertwich, R. Lifset, S. Pauliuk und N. Heeren. Hg. v. International Resource Panel. United Nations Environment Program (UNEP). Nairobi. Online verfügbar unter https://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/resource_efficiency_and_climate_change_full_report.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.
- Klüfers, P.; Masala, C.; Tepel, T.; Tsetos, K. (2017): Strategic Foresight. Die Zukunft antizipieren. vol. 1, no. 1. Hg. v. SIRIUS - Zeitschrift für Strategische Analysen (pp. 53-67). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/sirius-2017-0004>.
- Le Den, X.; Porteron, S.; Collin, C.; Hvid Horup Sorensen, L.; Herbst, A.; Rehfeldt, M. et al. (2020): The decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions. Final report. Hg. v. European Environmental Agency (EEA). Ramboll; Fraunhofer ISI; Ecologic. Online verfügbar unter <https://ramboll.com/-/media/files/rm/rapporter/methodology-and-analysis-of-decarbonization-benefits-of-sectoral-circular-economy-actions-17032020-f.pdf?la=en>, zuletzt geprüft am 20.07.2022.
- Lindner, J.; Eberle, U.; Schmincke, E.; Luick, R.; Niblick, B.; Brethauer, L. et al. (2019): Biodiversität in Ökobilanzen. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN) (BfN-Skripten, 528). Online verfügbar unter <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript528.pdf>, zuletzt geprüft am 15.07.2022.
- Marscheider-Weideman, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E. et al. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Berlin.
- Mostert, Clemens; Bringezu, Stefan (2019): Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors. In: *Resources* 8 (2), S. 61. DOI: 10.3390/resources8020061.
- Mudd, Gavin M. (2010): The Environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. In: *Resources Policy* 35 (2), S. 98–115. DOI: 10.1016/j.resourpol.2009.12.001.
- Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/52/076/52076012.pdf, zuletzt geprüft am 15.07.2022.
- Rehfeldt, Matthias; Fleiter, Tobias; Worrell, Ernst (2018): Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. In: *Journal of Cleaner Production* 187, S. 98–110. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.179.
- Rehfeldt, Matthias; Globisch, Joachim; Fleiter, Tobias (2019): Fuel choice in industrial steam generation: Empirical evidence reveals technology preferences. In: *Energy Strategy Reviews* 26, S. 100407. DOI: 10.1016/j.esr.2019.100407.

- Schaffartzik, Anke; Eisenmenger, Nina; Krausmann, Fridolin; Weisz, Helga (2014): Consumption-based Material Flow Accounting. In: *Journal of Industrial Ecology* 18 (1), S. 102–112. DOI: 10.1111/jiec.12055.
- Schubert, K.; Klein, M. (2018): Das Politiklexikon. Begriffe, Fakten, Zusammenhänge. 7., überarb. u. erw. Aufl. Hg. v. Bonn Verlag: Dietz.
- Stadler, Konstantin; Wood, Richard; Bulavskaya, Tatyana; Södersten, Carl-Johan; Simas, Moana; Schmidt, Sarah et al. (2018): EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. In: *Journal of Industrial Ecology* 45 (3), S. 539. DOI: 10.1111/jiec.12715.
- Tukker, Arnold; Jansen, Bart (2006): Environmental Impacts of Products: A Detailed Review of Studies. In: *Journal of Industrial Ecology* 10 (3), S. 159–182. DOI: 10.1162/jiec.2006.10.3.159.
- Umweltbundesamt (2016): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2016. Unter Mitarbeit von Stephan Lutter, Stefan Giljum, Mirko Lieber (WU-Wien) und Christopher Manstein (UBA). Hg. v. Umweltbundesamt. Wirtschaftsuniversität Wien (WU) – Institute for Ecological Economics und Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-nutzung-naturerlicher-ressourcen>, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Umweltbundesamt (29.11.2018): Rohstoffkonsum steigt wieder an - auf 16,1 Tonnen pro Kopf und Jahr. UBA empfiehlt ermäßigte Mehrwertsteuer auf ressourcensparende Waren und Dienstleistungen. Nr. 39/2018. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/rohstoffkonsum-steigt-wieder-an-auf-161-tonnen-pro>, zuletzt geprüft am 12.07.2022.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2012): Glossar zum Ressourcenschutz. Dessau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>, zuletzt geprüft am 03.01.2017.
- Umweltbundesamt (UBA) (2013): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_biomasse_bf_klein.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- United Nations (1992): Convention on Biological Diversity. CBD, zuletzt geprüft am 18.07.2022.
- Wilting, Harry C.; Schipper, Aafke M.; Bakkenes, Michel; Meijer, Johan R.; Huijbregts, Mark A. J. (2017): Quantifying Biodiversity Losses Due to Human Consumption: A Global-Scale Footprint Analysis. In: *Environmental science & technology* 51 (6), S. 3298–3306. DOI: 10.1021/acs.est.6b05296.
- WWF (2020): Positionspapier "Circular Economy". Online verfügbar unter <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Position-CircularEconomy.pdf>, zuletzt geprüft am 04.05.2022.
- WWF; Wuppertal Institut (2021): Vom Flickenteppich zur echten Kreislaufwirtschaftsstrategie. Impulspapier. Online verfügbar unter <https://www.wwf.de/zusammenarbeit-mit-unternehmen/circular-economy/impulspapier>, zuletzt geprüft am 04.05.2022.
- WWF Deutschland (2022): Ernährung und biologische Vielfalt. Der kulinarische Kompass: Ernährung und Biodiversität, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Anhang I. Literatur zur Bewertung der Produktperspektive

Acatch (2021): Circular Economy Roadmap für Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/>

Agora Energiewende (2022): Den Kreis schließen: Die Kreislaufwirtschaft als Beitrag zur industriellen Dekarbonisierung. Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/en/events/closing-the-loop/>

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. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/big-points-des-ressourcenschonenden-konsums-als>

Baldassarri, C., Allacker, K., Reale, F., Castellani, V. and Sala, S. (2017): Consumer footprint. Basket of products indicator on housing. Hg. v. European Commission (JRC). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107958>

Böckin, D.; Willskytt, S.; André, H.; Tillman, A.; Ljunggren Söderman, M. (2020): How product characteristics can guide measures for resource efficiency — A synthesis of assessment studies. In Resources, Conservation and Recycling 154, p. 104582.

Castellani, V., Fantoni, M., Cristobal Garcia, J., Zampori, L. and Sala, S. (2017): Consumer footprint. Basket of products indicator on mobility. Hg. v. European Commission (JRC). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107954>

Castellani, V., Fusi, A. and Sala, S. (2017): Consumer footprint. Basket of products indicator on food. Hg. v. European Commission (JRC). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107959>

Circle Economy (2022): The Circularity Gap Report 2022 (pp. 1-64, Rep.). Amsterdam. Online verfügbar unter <https://www.circularity-gap.world/2022#Download-the-report>

Dewulf, J.; Manfredi, S.; Sala, S.; Castellani, V.; Góralczyk, M.; Notarnicola, B.; Tassielli, G.; Renzulli, P.; Ferrão, P.; Pina, A.; Baptista, P.; Lavagna, M. (2014): Indicators and targets for the reduction of the environmental impact of EU consumption: Basket-of-products indicators and proto-type targets for the reduction of environmental impact of EU consumption. Hg. v. European Commission (JRC). Online verfügbar unter http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/JRC92892_qms_h08_lcind_deliverable5_final_20141125.pdf

Hertwich, E.; Lifset, R.; Pauliuk, S.; Heere, N. (2020): Resource Efficiency and Climate Change - Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Hg. v. United Nations Environment Programme. Online verfügbar unter <https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change>

Hünecke, K.; Heyen, D. A.; Ostertag, K. (2022): Strukturwandel zu einer Green Economy -. Screening besonders betroffener Branchen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strukturwandel-zu-einer-green-economy>

Jacob, K.; Postpischil, R.; Graaf, L.; Ramezani, M.; Ostertag, K.; Pfaff, M.; Reuster, L.; Zerkawy, F. (2021): Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Potenziale, Hemmnisse und Maßnahme. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-02-25_texte_32-2021_handlungsfelder_ressourceneffizienz.pdf

Le Den, X.; Porteron, S.; Collin, C.; Horup Sorensen, L. H.; Herbst, A.; Rehfeldt, M. et al. (2020): Quantification methodology for, and analysis of, the decarbonisation benefits of circular economy actions. Final Report. Hg. v. Europäische Umweltagentur. Online verfügbar unter <https://ram-boll.com/-/media/files/rm/rapporteur/methodology-and-analysis-of-decarbonization-benefits-of-sectoral-circular-economy-actions-17032020-f.pdf?la=en>

Lutter, S.; Giljum, S.; Gözet, B.; Wieland, H.; Manstei, C. (2018): Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2018. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/deuress18_de_bericht_web_f.pdf

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): RESCUE Studie des Umweltbundesamtes. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>

Reale, F., Castellani, V., Hischer, R., Corrado, S. and Sala, S. (2019): Consumer Footprint: Basket of Products indicators on household appliances, Consumer Footprint: Basket of Products indicators on household appliances. Hg. v. European Commission (JRC). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC116704>

Anhang II. Literatur zur Bewertung der Materialperspektive

Andrulleit, H.; Elsner, H.; Henning, S. Homberg-Heumann, D.; Kreuz, A.; Kuhn, K.; Moldenhauer, K.; Pein, M.; Schauer, M.; Schmidt, S.; Schmitz, M.; Sievers, H.; Szurlies, M.; Wilken, H. (2020): Deutschland – Rohstoffsituation 2019. Hg. v. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/roh-sit-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

BGR (2013): Aluminium/Bauxit - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, November 2013.

BGR (2021): Kupfer - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Mai 2021.

Buchert, M.; Bulach, W.; Degreif, S.; Hermann, A.; Hünecke, K.; Mottschall, M. et al. (2017): Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoff-wirtschaft. Hg. v. Öko-Institut e.V. Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Abschlussbericht_D2049.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2019.

Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Auberger, A.; Kämper, C. et al. (2020a): Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekoress-ii>.

Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Kemper, L.; Auberger, A. et al. (2020b): Environmental Criticality of Raw Materials. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/environmental-criticality-of-raw-materials>.

DERA-Rohstoffliste (2021): Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten – potenzielle Preis- und Lieferlisten. DERA Rohstoffinformationen 49, Deutsche Rohstoffagentur, Berlin, Februar 2021.

European Commission (DG DROW) (Hg.) (2017a): Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets. Deloitte Sustainability.; British Geological Survey; Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

European Commission (DG DROW) (Hg.) (2017b): Study on the review of the list of critical raw materials. final report. Deloitte Sustainability.; British Geological Survey; Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Lutter, S.; Giljum, S.; Gözet, B.; Wieland, H.; Manstei, C. (2018): Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2018. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/deuress18_de_bericht_web_f.pdf

Steger, S.; Ritthoff, M.; Bulach, W.; Schüler, D.; Kosińska, 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. Hg. V. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27_texte_34-2019_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf.

WV Metalle (2020a): 19.20 – Der Geschäftsbericht der Nichteisen-Metallindustrie, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, Mai 2020.

WV Stahl (2020b): Metallstatistik 2020 – Gemeinsam aufbrechen, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, November 2021.

WV Stahl (2021a): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland – 2021, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, Dezember 2021.

WV Stahl (2021b): Engagement für Stahl - Jahresbericht 2021, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Berlin, November 2021.

Anhang III. Literatur zur Bewertung von Circular Economy-Maßnahmen (Kapitel 3.4)

Afb (2022): Nachhaltigkeit durch IT-Remarketing. Afb social & green IT. Online verfügbar unter <https://www.afb-group.de/nachhaltigkeit/wirkung/>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Alderman D. (2013). Housing and construction markets. In: UNECE/FAO (ed.) Forest Products Annual Market Review 2012-2013. Geneva Timber and Forest Study Paper 33. Forestry and Timber Section, Geneva, Switzerland. p. 115-122.

Forrest, A.; Hilton, M.; Ballinger, A.; Whittaker, D. (2017): Circular economy opportunities in the furniture sector. This report was produced for the European Environment Bureau (EEB) by Eunomia Research & Consulting Ltd.

Close, A. et al. (2019a): D4.8 A roadmap to reduce food waste in Europe. Online verfügbar unter https://eu-refresh.org/sites/default/files/REFRESH%20D4.8_Road%20Map.pdf, zuletzt geprüft am 08.07.2022.

Apple (2022): Apple setzt in seinen Produkten verstärkt auf recycelte Materialien. Das Unternehmen treibt neue Demontagetechnologie als Teil des Ziels eines geschlossenen Kreislaufs voran. Online verfügbar unter <https://www.apple.com/de/newsroom/2022/04/apple-expands-the-use-of-recycled-materials-across-its-products/>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Artola, I., Rademaekers, K., Williams, R., & Yearwood, J. (2016): Boosting building renovation: What potential and value for Europe? European Parliament. Online verfügbar unter [https://www.euro-parl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU\(2016\)587326_EN.pdf](https://www.euro-parl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/587326/IPOL_STU(2016)587326_EN.pdf), zuletzt geprüft am 19.07.2022.

B. Kohla, M. Fellendorf (2015): Lenken und Leiten des städtischen Verkehrs. *Elektrotech. Inftech.* **132**, 389–394 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0342-1>, Springer Verlag Wien.

Berlett-Mattis, M. (2021): Phone as a Service, Trend Report. Online verfügbar unter <https://www.trendreport.de/phone-as-a-service/>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Brandt, M. (2022): Es muss nicht immer Fast Fashion sein. Statista, Online verfügbar unter, <https://de.statista.com/infografik/27355/umfrage-zum-kauf-von-secondhand-produkten/>, zuletzt geprüft 08.07.2022

Braun, M., Herrmann, S., Kick, M., Kobus, J., Stuchtey, M., Teuber, A., (2021) Everything-as-a-Service How businesses can thrive in the age of climate change and digitalization, XaaS, Systemiq, Sun institute. Online verfügbar unter <https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2021/11/XaaS-MainReport.pdf>, zuletzt geprüft 19.07.2022.

Buchert, M. Degreif, S., Schüler, D., Prakash, S., Möller, M., Köhler, A. (2019): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-14_texte_03-2019_subskrit_abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

Buildings (2020), Minimum space standards, Designings Buildings, the construction wiki, online verfügbar unter, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Minimum_space_standards, zuletzt geprüft am 13.07.2022.

Bulach, W. et al. (2022): Überprüfung der Wirksamkeit des § 21 VerpackG und Entwicklung von Vorschlägen zur rechtlichen Weiterentwicklung, Öko-Institut e.V., HTP GmbH & Co. KG, cyclos

GmbH, Institut cyclos-HTP GmbH, eine Studie für das Umweltbundesamt, Veröffentlichung voraussichtlich Mitte 2022.

Bulach, W. et al. (2022a): Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Öko-Institut e.V., eine Studie für die elf dualen Systeme, Darmstadt 2022.

Bundesverband Carsharing (2022): Aktuelle Zahlen und Fakten zum CarSharing in Deutschland. Online verfügbar unter <https://carsharing.de/alles-ueber-carsharing/carsharing-zahlen/aktuelle-zahlen-fakten-zum-carsharing-deutschland>, zuletzt geprüft 07.08.2022.

Bygtek.dk (2017) 'Genbrug af gode gamle mursten. Online verfügbar unter <https://bygtek.dk/artikel/facader/genbrug-af-gode-gamle-mursten>, zuletzt geprüft 13.07.2022.

Chau, C. K. et al. (2012) 'Assessment of CO₂ emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options'. In: Resources, Conservation and Recycling, 61, pp. 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.001>.

Che Y, M. Y. (2015), A brief introduction to 3D printing technology, GRC 2015 Dubai, p. 4.

ChemSec (2020): What goes around. Enabling the circular economy by removing chemical roadblocks. Hg. v. International Chemical Secretariat, Göteborg.

Crishna, N., Banfill, P. F. G. and Goodsir, S. (2011): Embodied energy and CO₂ in UK dimension stone, In: Resources, Conservation and Recycling. Elsevier, 55(12), pp. 1265–1273. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.014>.

Eveleigh, D. (2009) Evolution of Building Elements, University of West of England, Bristol. Online verfügbar unter, https://fet.uwe.ac.uk/conweb/house_ages/elements/section2.htm, zuletzt geprüft 13.07.2022.

Dehoust et al. 2009: Steuern oder Sonderabgaben für Getränkeverpackungen und ihre Lenkungswirkung. Studie für den NABU (Naturschutzbund Deutschland) e.V., Öko-Institut, November 2009.

Dell (2022): Dell 2-2-1 solution: 45.8 percent TCO savings versus a non virtualized configuration. Online verfügbar unter, https://i.dell.com/sites/csdocuments/Business_smb_sb360_Documents/en/us/wp-virtualization-tco.pdf, zuletzt geprüft 11.07.2022.

Demacsek, C., Tange, L., Reichenecker, A., & Altnau, G (2019): PolyStyreneLoop–The circular economy in action. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 323, No. 1, p. 012149). IOP Publishing.

Designing Buildings Wiki (2021): Construction waste disposal: Online verfügbar unter https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Construction_waste_disposal, zuletzt geprüft 13.07.2022.

Destatis (2022): Transporte und Verkehr – Güterverkehr. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/inhalt.html>, zuletzt geprüft 11.07.2022.

Duhoux, T., Maes, E., Hirschnitz-Garbers, M., Peeters, K., Asscherickx, L., Christis, M., Sachdeva, A. (2021): Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. European Commission, Brüssel.

Dunant, C. F. et al. (2018): Regularity and optimisation practice in steel structural frames in real design cases, Resources. In: Conservation and Recycling. Elsevier, 134, pp. 294–302. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.009>.

- Dutta, B.; Froes, F. H. (2016): Microstructure and Mechanical Properties, Additive Manufacturing of Titanium Alloys, pp. 41–50, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804782-8.00004-5>.
- Eberhardt, L. C. M.; Birgisdóttir, H.; Birkved, M. (2019). Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. In: Building Research & Information, 47(6), 666-680.
- Ellen MacArthur Foundation, Sun, and McKinsey Center for Business and Environment. (2015). Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe. Ellen Mac Arthur Foundation, Sun, and McKinsey Center for Business and Environment. Page 45.
- EPDdanmark (2017), EPD Gamle Mursten, <https://www.epddanmark.dk/media/ft5iom00/md-16007-en-gamle-mursten.pdf>, zuletzt geprüft 13.07.2022.
- Eskilsson, P. (2015) Renovate or rebuild? - a comparison of the climate impact from renovation compared to demolition and new construction for a multi-dwelling building built in the era of the "Million Programme" using lifecycle assessment. Göteborg.
- Fabio De Menna et al. (2019), LCA & LCC of food waste case studies, Assessment of food side flow prevention and valorisation routes in selected supply chains. Online verfügbar unter <https://eu-refresh.org/sites/default/files/D5.5%20LCA%20%20LCC%20of%20food%20waste%20case%20studies.pdf>, zuletzt geprüft am 08.07.2022.
- Fahrgemeinschaften. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/mobilitaet/fahrgemeinschaften#unsere-tipps>, zuletzt geprüft 07.08.2022.
- FAO (2022), Food Loss and Waste Database. Take an in-depth look at what food is being lost and wasted, and where, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/en/> zuletzt geprüft am 08.07.2022.
- Fennis S.A.A.M. (2011) Design of Ecological Concrete by Particle Packing Optimization, PhD Thesis, Delft, Delft University of Technology. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Sonja-Fennis/publication/254906850_Design_of_ecological_concrete_by_particle_packing_optimization/links/0c96052f5158b6e143000000/Design-of-ecological-concrete-by-particle-packing-optimization.pdf, zuletzt geprüft 13.07.2022.
- Fennis, S.; Walraven, J. C. (2012), Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design. In: Heron, 57(2), pp. 73–101, Niederlande.
- Fischer, A., Achterberg, E., Ballester, M. (2022): THE CIRCULAR PHONE, Legal, operational and financial solutions to unlock the potential of the 'Fairphone-as-a-Service' model. Online verfügbar unter <https://assets.website-files.com/5d26d80e8836af2d12ed1269/5dea57f99d58652614589821-26616471-0-The-Circular-Phone.pdf>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.
- Forslund, T.; Gorst, A.; Briggs, C.; Azevedo, D.; Smale, R. (2022): Tackling root causes, Halting biodiversity loss through the circular economy, Sitra studies 205.
- Gamlemursten (2013): The Rebrick Project. Online verfügbar unter, <http://www.gamlemursten.eu>, zuletzt geprüft 13.07.2022.
- Garbev, K. et al. (2014): Preparation of a novel cementitious material from hydrothermally synthesized C-S-H phases. In: Journal of the American Ceramic Society, 97(7), pp. 2298–2307.
- Garcia-Segura, T., Yepes, V., Alcala, J., (2014): Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. In: Int. J. Life Cycle Assess. 19, 3–12.

GfK (2021): Systematische Erfassung des Lebensmittelabfalls der privaten Haushalte in Deutschland - Schlussbericht 2020 von GfK SE, 30.9.2021. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Ernaehrung/Lebensmittelverschwendung/GfK-Analyse-2020.html?jsessionid=06ED431CAADE6D15EEBCAB6B49F86C72.live851>, zuletzt geprüft 08.07.2022.

Gonzalez-Garcia et al. (2012): Eco-innovation of a wooden childhood furniture set: An example of environmental solutions in the wood sector. In: Science of The Total Environment, Volume 426, 1 June 2012, pp 318-326.

Greenpeace (2015), Wegwerfware Kleidung, Repräsentative Greenpeace-Umfrage zu Kaufverhalten, Tragedauer und der Entsorgung von Mode. Online verfügbar unter, https://www.greenpeace.de/sites/default/files/publications/20151123_greenpeace_modekonsum_flyer.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Gröger, J., Liu, R., Löw, C. (2021): Produkte länger nutzen: Mit zirkulären Ansätzen die Umwelt entlasten. Potenziale der Circular City Berlin, veröffentlicht in Wissen. Wandel. Berlin. Report Nr. 8, Öko-Institut. Online verfügbar unter https://ecornet.berlin/sites/default/files/2021-10/EcornetBerlin_Report8_CiBER_Umweltentlastungspotenziale%20Circular%20City%20Berlin.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

Gsell, M. et al. (2022): Ökologische Verbrauchsteuer zur umweltfreundlichen Lenkung des Getränkeverpackungsmarktes. Studie zum ökologischen Nutzen und zur rechtlichen Machbarkeit für den NABU (Naturschutzbund Deutschland) e.V., Öko-Institut, Berlin.

GVM (2020 a): Vorverpackungen bei Obst und Gemüse, Zahlen und Fakten 2019, GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH. Studie für den NABU (Naturschutzbund Deutschland) e.V.. Online verfügbar unter <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/201027-nabu-studie-vorverpackungen.pdf>, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

GVM (2020): Bundesweite Erhebung von Daten zum Verbrauch von Getränken in Mehrweg- und ökologisch vorteilhaften Einweg- Getränkeverpackungen - Bezugsjahr 2018. GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, UBA-Texte 109/2020, Dessau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-24_texte-109-2020_moeve-2018.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

GVM (2021): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2019. GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, UBA-Texte 148/2021, Dessau.

Hanein, T.; Provis, J.; Kinoshita, H. (2018): On the sustainable development of cement. In: Proceedings, Young Researchers Forum IV-Innovation in Construction Materials. Sheffield

Hertwich, E.; Lifset, R.; Pauliuk, S.; Heeren, N (2020): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

Hopkinson, P.; Chen, H. M.; Zhou, K.; Wang, Y.; & Lam, D. (2018): Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 172, No. 3, pp. 119-128). Thomas Telford Ltd.

Hopkinson, P.; Chen, H. M.; Zhou, K.; Wang, Y.; Lam, D. (2018): Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability (Vol. 172, No. 3, pp. 119-128). Thomas Telford Ltd.

Hosseini, S.M.; Fadaei, M.; (2013): Properties of particleboard made from UF with lowformaldehyde (E1). Int. J. Eng. 26 (1), 45e49.

- Hurmekoski, E. (2016): Long-term outlook for wood construction in Europe. *Dissertationes Forestales*, 211, 57.
- ifeu/GVM (2021): Potenzial der Abfallvermeidung und des Ressourcenschutzes bei Reduktion von übermäßigen Verpackungen, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, eine Studie für den Bundesverband der Verbraucherzentrale, Heidelberg/Mainz.
- Iritani, D. R., Silva, D. L., Saavedra, Y. M. B., Graell, P. F. F., & Ometto, A. R. (2015): Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry. In: *Journal of Cleaner Production*, 96, 308-318.
- Jiménez, L. F., Domínguez, J. A. and Vega-Azamar, R. E. (2018): Carbon footprint of recycled aggregate concrete. In: *Advances in Civil Engineering*, 2018(May), pp- 1-6.
- Jordal-Jørgensen, J.; Karup Pedersen, J. (2016): Samfundsøkonomisk analyse af genbrug af mursten. Miljøstyrelsen, København.
- Köhler, A.; Watson, D.; Trzepacz, S.; Löw, C.; Liu, R.; Danneck, J.; Faraca, G. (2021): Circular economy perspectives in the EU Textile sector. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Kompasiana (2017): Celitement, A New Green Cement Innovation. Online verfügbar unter, <https://www.kompasiana.com/mercifourte/5a37577dab12ae173d1b66c4/celitement-a-new-green-cement-innovation>, zuletzt geprüft am 13.07.2022.
- Kuntscher, M.; Schmidt, T.; Goossens, Y. (2020): Lebensmittelabfälle in der Außer-Haus-Verpflegung,– Ursachen, Hemmnisse und Perspektiven. Thünen Working Paper 161, Thünen-Institut für Marktanalyse.
- Lane, T. (2012) Kingspan insulation collection scheme: Waste away, Building.co.uk. Online verfügbar unter, <https://www.building.co.uk/kingspan-insulation-collection-scheme-waste-away/5034054.article>, zuletzt geprüft 13.07.2022.
- Lange, U., (2017), Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen. Kurzanalyse Nr. 18, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH.
- Levänen, J., Uusitalo, V., Härrä, A., Kareinen, E., & Linnanen, L. (2021): Innovative recycling or extended use? Comparing the global warming potential of different ownership and end-of-life scenarios for textiles. In: *Environmental Research Letters*, 16(5), 054069.
- Marina Economidou (2011): Europe's buildings under the microscope, A country-by-country review of the energy performance of buildings, Buildings Performance Institute Europe.
- Masotti, M.; Stewart, G.; Close, A.; Setti, M.; Vittuari, M. (2019): D4.6 – Pan-European scenarios of food waste levels, Refresh. Online verfügbar unter, https://eu-refresh.org/sites/default/files/REFRESH_D4.6_Pan%20European%20Scenarios.pdf, zuletzt geprüft 08.07.2022.
- Miller, D. Doh, J.-H. (2015): Incorporating sustainable development principles into building design: a review from a structural perspective including case study. In: *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. John Wiley & Sons, Ltd, 24(6), pp. 421–439.
- Moynihan, M. C.; Allwood, J. M. (2014): Utilization of structural steel in buildings. In: *Proceedings. Mathematical, physical, and engineering sciences*. The Royal Society, 470 (2168), p. 20140170.

Nielsen, C. V. (2008): Article by Claus V. Nielsen Published in Proceedings NRMCA 2008 Concrete Technology Forum, June 2008, Denver, Proceedings NRMCA 2008 Concrete Technology Forum Denver, (June), pp. 1–14.

Nusselder, S., Samie Maqbool, A., Deen, R., Gregory Blake, Joris Bouwens, R. T. F. (2015): Closed-loop Economy: Case of Concrete in the Netherlands. Online verfügbar unter [https://www.slimbreker.nl/downloads/IPG-concrete-final-report\(1\).pdf](https://www.slimbreker.nl/downloads/IPG-concrete-final-report(1).pdf), zuletzt geprüft 13.07.2022.

NVBW (2020), FAKTENPAPIER „clever mobil“. Online verfügbar unter: https://www.radkultur-bw.de/Resources/Persistent/d511941cd169433dc03e4c11a05720dec1a6251c/200703_clever_mobil_Faktenpapier.pdf, zuletzt geprüft 07.08.2022.

Ökobaudat, online verfügbar unter <https://oekobaudat.de>, zuletzt geprüft 13.07.2022.

Öko-Test (2022), Umfrage: Hälfte der Deutschen würde gebrauchte Elektronikgeräte kaufen, Online verfügbar unter, https://www.oekotest.de/freizeit-technik/Umfrage-Haelfte-der-Deutschen-wuerde-gebrauchte-Elektronikgeraete-kaufen-12413_1.html, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Prakash, S., Antony, F., Köhler, A., Liu, R., 2016, Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC) Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Pauliuk, S., Fishman, T., Heeren, N., Berrill, P., Tu, Q., Wolfram, P., Hertwich, E.G., (2020): Linking Service Provision to Material Cycles – A New Framework for Studying the Resource Efficiency-Climate Change Nexus (RECC). J. Ind. Ecol. <https://doi.org/10.1111/jiec.13023>.

Pavel, C. und Blagoeva, D. (2018), Competitive landscape of the EU 's insulation materials industry for energy-efficient buildings, European Commission 2018, pp. 1–14. doi: 10.2760/251981.

Philipp Frohn (2019), Der Boom von Unverpacktläden – Wie Plastik-Vermeidung zum Geschäftsmodell wird, Handelsblatt, Online verfügbar unter https://www.handelsblatt.com/arts_und_style/lifestyle/nachhaltigkeit-der-boom-von-unverpacktlaeden-wie-plastik-vermeidung-zum-geschaeftsmodell-wird/24193944.html, zuletzt geprüft am 08.07.2022.

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2016). Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment–What does the evidence say? Journal of environmental management, 181, 687-700.

Prakash, S und Rüdenauer 2018, FAQ Langlebigkeit von Elektrogeräten im Haushalt, Reparieren oder neu kaufen? Fragen, Antworten (FAQs) und Tipps für ein langes Leben von Elektrogeräten im Haushalt. Öko-Insitut e.V. online verfügbar unter, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FAQ-Langlebigkeit-elektronische-Produkte.pdf>, zuletzt geprüft am 11.07.2022

Prakash, S., Dehoust, G., Gsell, M., Schleicher, T.; Stamminger, R. (2016): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“, Öko-Insitut e.V.. Online verfügbar unter, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/einfluss-der-nutzungsdauer-von-produkten-auf-ihre-1>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Prakash, S., Dehoust, G., Gsell, M., Schleicher, T. Gensch, C.O., Graulich, K., Antony, F., Köhler, A., Hilbert, I. (2016): Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“ – Verbraucherbefragung, Öko-Insitut e.V.. Online verfügbar unter, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_11_2016_anlage_verbraucherbefragung.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Ranganathan J., Vennard D., Waite R., Dumas P., Lipinski B. and Searchinger T. (2016): Shifting Diets for a Sustainable Food Future. World Resources Institute.

Rengel, A. (2017), Recycled Textile Fibres and Textile Recycling. An overview of the Market and its possibilities for Public Procurers in Switzerland. commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN), Contractor: Be Sustainable

Ritchie H. and Roser M. (2019) "Land Use" in Our World in Data

Ritzenhoff, A., 2016, Materialeffiziente Massenfertigung von LED-Leuchtmitteln am Standort Deutschland – LED-Business, Seidel GmbH & Co. KG, Online verfügbar unter, https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/2019-09/abschlussbericht_led-business_seidel_gmbh.pdf, zuletzt geprüft 14.07.2022.

Rodt, S.; Georgi, B.; Huckestein, B.; Mönch, L.; Herbener, R.; Jahn, H.; Koppe, K.; Lindmaier, J. (2010): CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland, Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale. Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes; Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-emissionsminderung-im-verkehr-in-deutschland?anfrage=Kennummer&Suchwort=3773>, geprüft 07.08.2022.

Rudolph, F. (2020): Die Klimaschutzwirkung der Flottenverbrauchsnorm in Deutschland, Möglichkeiten zur Erhöhung der Ambition und flankierende Politikinstrumente, Wuppertal Institut. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7784/file/7784_Rudolph.pdf, zuletzt geprüft 08.07.2022.

Rüdenauer, I. und Prakash, S. (2020): Ökonomische und ökologische Auswirkungen einer Verlängerung der Nutzungsdauer von elektrischen und elektronischen Geräten, Am Beispiel von Smartphones, Notebooks, Waschmaschinen, Fernsehgeräte und E-Bikes (Pedelects). Studie im Auftrag der Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv), durchgeführt vom Öko-Institut e.V.. Online verfügbar unter, <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/vzbv-Verlaengerung-Nutzungsdauer.pdf>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Sandin, G., Roos, S., Spak, B., Zamani, B., & Peters, G. (2019). Environmental assessment of Swedish clothing consumption — six garments, Sustainable Futures. Gothenburg, Sweden, 167.

Sandin, Gustav; Peters, Grag M. (2018): Environmental impact of textile reuse and recycling - A review. In: Journal of Cleaner Production 184, S. 353–365.

Santos, A.; de Brito, J. (2007), Building deconstruction in Portugal: a case study. In: Proceedings of Portugal SB07 Conference—sustainable construction, materials and practices—challenge of the industry for the new millennium (pp. 1059-1066).

Sathre R., Gustavsson L. (2009). A state-of-the-art review of energy and climate effects of wood product substitution. Växjö University, Report No. 57.

Schmidt, A.; Watson, D.; Roos, S.; Askham, C.; Brunn Poulsen, P. (2016): Gaining benefits from discarded textiles – LCA of different treatment pathways. LCA of different treatment pathways. Hg. v. Nordic Council of Ministers. Denmark (TemaNord, 537)

Schmidt, T., Schneider, F.; Leverenz, D.; Hafner, G. (2019), Lebensmittelabfälle in Deutschland – Baseline 2015 –, Thünen Report 71, Thünen-Institut für Ländliche Räume, Braunschweig/Germany

Schödwel, B., Zarnekow, R., Liu, R., und Gröger, J. (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbar-

keit, Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23_texte_19-2018_ressourcenfizienzen-rechenzentren.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

Simonen, K., Rodriguez, B. X. and De Wolf, C. (2017) 'Benchmarking the Embodied Carbon of Buildings', Technology Architecture and Design. Routledge, 1(2), pp. 208–218.

Skullestad, J. L., Bohne, R. A. and Lohne, J. (2016) High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A Comparative LCA of Structural System Alternatives, Energy Procedia. Elsevier, 96, pp. 112–123.

Sonnenberg, V. (2013): Textiles Leasing wächst dynamisch, Maschinen Markt. Online verfügbar unter <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/textiles-leasing-waechst-dynamisch-a-399144/>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Splendid Research (2018) Studie: Unverpackt Einkaufen in Deutschland, Eine repräsentative Umfrage unter 1016 Deutschen zum Potenzial von Unverpackt-Läden. Online verfügbar unter <https://www.splendid-research.com/de/studie-unverpackt-einkaufen?idU=1>, zuletzt geprüft am 08.07.2022.

Stahl, H., Mehlhart, G., Gsell, M., et al. (2021), Study to identify and assess the feasibility of measures to enhance the impact of Directive 2006/66/EC: final report, Publications Office, Europäische Kommission, Generaldirektion Umwelt. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2779/982178>.

Stahl, H., Mehlhart, G., Gsell, M., et al., Assessment of options to improve particular aspects of the EU regulatory framework on batteries: final report, Publications Office, 2021, Europäische Kommission, Generaldirektion Umwelt, Online verfügbar unter, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/432234>, zuletzt geprüft 08.07.2022.

Stemmermann, P., Schweike, U., Garbev, K., und Beuchle et, G., (2010) 'Celitement – a sustainable prospect for the cement industry'. In: Cement International, 8(5), pp. 52–66

Stemmermann, P.; Beuchle, G.; Garbev, K.; Schweike, U. (2011): 'Celitement® – A new sustainable hydraulic binder based on calcium hydrosilicates'. 13th International Congress on the Chemistry of Cement., pp. 1–7.

Stephanie Wunder, Leonie Hasselberg, Irina Herb (2021), Maßnahmen gegen Lebensmittelverschwendung in Haushalten erfolgreich planen, Ein Leitfaden zur Maßnahmenentwicklung anhand einer Wirkungslogik, ecologic, online verfügbar unter, <https://www.ecologic.eu/sites/default/files/publication/2022/30004-Leitfaden-Ma%C3%9Fnahmenentwicklung-Wirkungslogik.pdf>, zuletzt geprüft am 08.07.2022.

Suresh, A.; Taheraly, L.; UN FICCA Raw Materials Working Group (2021): Identifying Low Carbon Sources of Cotton and Polyester Fibers. Phase 1 (Part I). Fashion Industry Charter for Climate Action. Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/resource/UCC_Cotton_Pet_report.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2022.

Teltarif (2022), Refurbished-Smartphones: Markt um 15 Prozent gewachsen, online verfügbar unter, <https://www.teltarif.de/smartphones-refurbished-markt-entwicklung-wachstum/news/87926.html>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Tingley, D., ;Allwood, J., (2014): Reuse of structural steel: the opportunities and challenges, European Steel Environment & Energy Congress, 15-17 September 2014, Teeside University.

UBA (2021): Elektro- und Elektronikaltgeräte. Umweltbundesamt, online verfügbar unter, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete#sammlung-und-verwertung-von-elektro-und-elektronikalt-geraten-drei-kennzahlen-zahlen>, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

UBA (2022): Verpackungsabfälle. Umweltbundesamt, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/verpackungsab-faelle#grunde-fur-den-anstieg-der-verpackungsabfalle>, zuletzt geprüft am 08.07.2022.

Ungerth und Carlsson (2011), A. Vad Händer Sen Med Våra Kläder? Enkätundersökning (What Is Done with Our Clothes? A Survey). Konsumentföreningen, Stockholm.

Upton, B.; Miner, R.; Spinney, M.; Heath, L. (2008): The greenhouse gas and energy impacts of using wood instead of alternatives in residential construction in the United States', Biomass and Bioenergy. 32: 1-10., 32. Online verfügbar unter <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/18897>, zuletzt geprüft 13.07.2022.

Wechsler, A.; Zaharia, M.; Crosky, A.; Jones, H.; Ramirez, M.; Ballerini, A.; Nunez, M.; Sahajwalla, V. (2013), Macadamia (Macadamia intergrifolia) shell and castor (Ricinus communis) oil based sustainable particleboard: a comparison of its properties with conventional wood-based particleboard. Mater. Des. 50, 117e123.

Wenker J.L., Rüter S. (2015): Ökobilanz-Daten für holzbasierte Möbel. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 130 p, Thünen Rep 31.

Le Den, X.; Porteron, S., Collin, C., Hvid Horup Sorensen, L.; Herbst, A.; Rehfeldt, M.; Pfa, M.; Hirschnitz-Garbers, M.; Velte, E. (2020): The decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions. European Environment Agency, EEA/ACC/18/001/LOT.

ZVEI (2021): Kunststoffrezyklate in der Elektroindustrie - Synergien und Zielkonflikte einer nachhaltigen Umsetzung in der Praxis, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. Online verfügbar unter, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2021/Mai/Wegweiser_zu_Kunststoffrezyklaten_in_der_Elektroindustrie/Wegweiser-Kunststoff-rezyklate-in-der-Elektroindustrie.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2022.

Anhang IV. Liste der in EXIOBASE erfassten Umweltkategorien

Tabelle 21: Umweltwirkungskategorien der BR Toolbox #64 der Europäischen Kommission und Korrespondenz mit Indikatoren in EXIOBASE; GWP100 basiert auf IPCC AR 6²⁴

Wirkungskategorie	Indikator	
Klimawandel	Treibhausgas (THG)	Treibhauspotenzial (global warming potential, GWP ₁₀₀)
	CO ₂	1
	CH ₄	27,9
	N ₂ O	273
	SF ₆	25200
	HFCs	10740
	PFCs	8748
Abbau Ozonschicht	-	
Humantoxizität, krebserregende Wirkung	As	
	Cd	
	Cr	
	Ni	
	PCB	
	PAH	
	Benzo(a)pyrene	
	Benzo(b)fluoranthene	
	Benzo(k)fluoranthene	
Humantoxizität, nicht krebserregende Wirkung	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	
	HCB	
	PCDD/F	
	Hg	
Feinstaub	Pb	
	TSP	
	PM10	

²⁴ Nach IPCC 2021; https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf; letzter Zugriff am 18.07.2022
Charakterisierungsfaktoren für HFCs und PFCs wurden basierend auf <https://www.epa.gov/ghgreporting/fluorinated-greenhouse-gas-emissions-and-supplies-reported-ghgrp#production> berechnet

Wirkungskategorie	Indikator
	PM2.5
Ionisierende Strahlung, menschliche Gesundheit	-
Ionisierende Strahlung, Ökosystem	-
Photochemische Ozonbildung	CO
	NOx
	NMVOC
Versauerung	CO ₂
	CH ₄
	NOx
	SOx
	NH ₃
Eutrophierung, terrestrisch	N
	NOx
	NH ₃
	P
	Pxx
Eutrophierung, aquatisch	N
	P
	NH ₃
	NO ₂
Ökotoxizität (Süßwasser/ terrestrisch und Salzwasser)	As
	Cd
	Cr
	Ni
	PCB
	PAH
	Benzo(a)pyrene
	Benzo(b)fluoranthene
	Benzo(k)fluoranthene

Wirkungskategorie	Indikator
	Indeno(1,2,3-cd)pyrene
	HCB
	PCDD/F
	Cu
	Hg
	Pb
	Zn
	Se
Landnutzung	Kulturfähiges Land (9 Kategorien)
	Permanentes Weideland
	Genutzter Forst
	Genutztes anderes Land
	Land für Infrastruktur
Ressourcenabbau Wasser	Wasserverbrauch grün (13 Kategorien)
	Wasserverbrauch blau (103 Kategorien)
	Wasserentnahme blau (78 Kategorien)
Ressourcenabbau, mineralisch, fossil and erneuerbar	Genutzte heimische Entnahme, Biomasse, metallische/nicht-metallische Minerale, fossil (227 Kategorien)
	Ungenutzte heimische Entnahme, Biomasse, metallische/nicht-metallische Minerale, fossil (223 Kategorien)