www.oeko.de

Modell Deutschland Circular Economy

Modellierung und Folgenabschätzung einer Circular Economy in 9 Sektoren in Deutschland

Freiburg, Mai 2023

Im Auftrag des WWF Deutschland

Autor*innen

Öko-Institut e.V.

Siddharth Prakash, Clara Löw, Dr. Florian Antony, Günter Dehoust, Kevin Stuber-Rousselle, Ran Liu, Lucía Gascón Castillero, Viviana López Hernandez, Katharina Hurst, Dr. Andreas R. Köhler, Dr. Nino Schön-Blume

Fraunhofer ISI

Dr. Antonia Loibl, Dr. Luisa Sievers, Malte Besler, Dr. Michaela Schicho, Meta Thurid Lotz, Elisabeth Eberling, Dr. Sabine Langkau, Dr. Andrea Herbst, Dr. Luis Tercero Espinoza, Dr. Claus Doll, Dr. Matthias Pfaff

Freie Universität Berlin

Dr. Klaus Jacob, Dr. Valentin Fiala, Helene Helleckes

Ansprechpersonen

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

Zusammenfassung 6

Executive Summary 11

Danksagung 15

1 Hintergrund 16

2 Zielsetzung der Studie 18

3 Methodisches Vorgehen 19

3.1 Szenario-Entwicklung 19

3.2 Auswahl von Sektoren und Maßnahmen für die Modellierung der Circular Economy 25

3.3 Ökologische und ökonomische Kenngrößen für die Modellierung 26

3.3.1 Ökologische Kenngrößen 26

3.3.2 Sozioökonomische Kenngrößen 28

3.3.3 Kritikalität & Rohstoffversorgungssicherheit 29

3.4 Wirkmodelle 29

3.5 Modellierung 30

3.5.1 Einführung 30

3.5.2 Allgemeiner Ansatz und Beschreibung des Modellsystems 31

3.5.3 Implementierung des Modellsystems 37

3.5.4 Ansätze zur Abschätzung von Biodiversitätseffekten der Circular Economy 38

3.5.5 Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen 40

3.5.6 Kritikalität 45

3.5.7 Externe Kosten 49

3.5.7.1 Scope 49

3.5.7.2 Methode 51

4 Folgenabschätzung einer Circular Economy in Deutschland 53

4.1 Ökologische Wirkungen 53

4.1.1 Gesamtüberblick 53

4.1.1.1 Treibhausgasemissionen 53

4.1.1.2 Ressourceninanspruchnahme 62

4.1.1.3 Landnutzung/ Biodiversität 73

4.1.2 Sektorspezifische Ergebnisse 78

4.1.2.1 Fahrzeuge und Batterien 78

4.1.2.2 Hoch- und Tiefbau 84

4.1.2.3 IKT und Haushaltsgeräte 96
4.1.2.4 Lebensmittel und Ernährung 102
4.1.2.5 Textilien 112
4.1.2.6 Möbel 118
4.1.2.7 Beleuchtung 124
4.1.2.8 Verpackungen 131
4.2 Kritikalität: Änderung im Bedarf bzw. Bereitstellung kritischer und stark umweltbelastender Rohstoffe 140
4.2.1 Gesamtüberblick 141
4.2.2 Rohstoffbilanzierung auf Sektorebene 148
4.2.2.1 Fahrzeuge und Batterien 148
4.2.2.2 Hoch- und Tiefbau 152
4.2.2.3 IKT und Haushaltsgeräte 155
4.2.2.4 Lebensmittel und Ernährung 158
4.2.2.5 Textilien 161
4.2.2.6 Möbel 161
4.2.2.7 Beleuchtung 163
4.2.2.8 Verpackungen 166
4.3 Soziökonomische Effekte 168
4.3.1 Einführung 168
4.3.2 Gesamtüberblick: Bruttowertschöpfung & Arbeitskräftebedarf 168
4.3.3 Strukturelle Effekte: Bruttowertschöpfung & Arbeitskräftebedarf 171
4.4 Externe Kosten 182
4.4.1 THG-bedingte Umweltkosten der Szenarien 182
4.4.2 Einordnung Umweltkosten 184
5 Diskussion 190
6 Fazit und Ausblick 199
Literaturverzeichnis 202
Abbildungsverzeichnis 220
Tabellenverzeichnis 225
Abkürzungsverzeichnis 229
7 Anhang 231
7.1 R-Strategien 231
7.2 Sektorspezifische Modellierungsparameter 231

7.2.1 Fahrzeuge und Batterien 232
7.2.2 Hoch- und Tiefbau 241
7.2.3 IKT und Haushaltsgeräte 249
7.2.4 Ernährung und Lebensmittel 257
7.2.5 Textilien 269
7.2.6 Möbel 277
7.2.7 Beleuchtung 284
7.2.8 Verpackungen 295
7.3 Narrative der vier MDCE-Szenarien 303
7.4 Rahmenbedingungen gemäß Projektionsbericht 307
7.5 Endbericht der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) „Schätzung ambitionierter Vermeidungspotenziale bei Verpackungen in Deutschland“ 308

Zusammenfassung

Der Ressourcenverbrauch in Deutschland befindet sich auf einem sehr hohen Niveau. Im Jahr 2019 verbrauchte Deutschland um 30 % mehr Ressourcen als der globale Durchschnitt. Die Entnahme und Aufbereitung von Rohstoffen sowie die Nutzung und Entsorgung der aus Rohstoffen produzierten Güter schaffen bzw. verschärfen viele Umweltprobleme, wie Verstärkung des Klimawandels, Verlust der biologischen Vielfalt, Bodendegradation und Wasserknappheit. Insbesondere ist die Einhaltung der Klimaziele ohne eine Reduktion des Rohstoffverbrauchs nicht möglich, da ein großer Anteil der Treibhausgase Deutschlands mit etwa 40 % auf die Entnahme und Verarbeitung von Rohstoffen zurückzuführen ist (UBA 2022b). Neben der Verschärfung von Umweltproblematiken ist ein hoher Rohstoffverbrauch auch ein Risikofaktor hinsichtlich der Energie- und Rohstoffversorgung. Er stärkt Abhängigkeiten von anderen Staaten, was insbesondere bei politisch instabilen oder autokratischen Regimes problematisch ist. Nicht zuletzt bestehen große soziale und menschenrechtliche Probleme, die mit der Extraktion von Rohstoffen einhergehen.

Um seinen Rohstoffbedarf zu senken, muss Deutschland eine umfassende und systematische Strategie entwickeln, wie der Übergang zu einer ganzheitlichen Circular Economy gelingen kann. Die vorliegende Studie wurde im Rahmen des Vorhabens „**Modell Deutschland Circular Economy (MDCE)“** vom WWF Deutschland durchgeführt. Die modellbasierte ökologische und ökonomische Folgenabschätzung einer Circular Economy in Deutschland schafft fundierte, wissenschaftliche Grundlagen zur Ableitung von quantifizierbaren Zielen und Festlegung von Prioritäten.

Die vorliegende Studie ist die **erste umfassende Studie im Bereich Circular Economy in Deutschland**. Sie deckt Folgendes ab:

- 9 Sektoren: Fahrzeuge und Batterien, Hoch- und Tiefbau, IKT und Haushaltsgeräte, Lebensmittel und Ernährung, Textilien, Möbel, Beleuchtung und Verpackungen,
- 63 Circular Economy-Maßnahmen: Betrachtung aller R-Strategien[1],
- 7 Wirkkategorien: Treibhausgasemissionen, Ressourceninanspruchnahme, Landnutzung, Biodiversität, Bruttowertschöpfung, Arbeitskräftebedarf und Rohstoffkritikalität und Versorgungssicherheit,
- 1 hybrides Modellsystem bestehend aus 4 Modelltypen: Multiregionales Input-Output-Modell (EE-MRIO), Ökobilanz (LCA), Industrie-Simulationsmodell FORECAST und Materialflussmodell (MFA).

Die Wirkungsabschätzung bezieht sich auf die Nachfrage in neun abgegrenzten Sektoren in Deutschland. Diese wurden ausgewählt, weil ihre Produktion und Nutzung mit hohen Umweltbelastungen verbunden sind und sie entsprechend hohe Potenziale für Nutzen aus Circular Economy-Maßnahmen (CE-Maßnahmen) bieten[2].

[1] 10 R-Strategien sind: (1) Refuse, (2) Rethink, (3) Reduce, (4) Reuse, (5) Repair, (6) Refurbish, (7), Remanufacture, (8) Repurpose, (9) Recycle, (10) Recover

[2] Siehe MDCE-Machbarkeitsstudie, Prakash et al. (2022)]

Die Studie zeigt, dass der Übergang zu einer Circular Economy mit substanziell positiven Wirkungen verbunden ist. Die CE-Maßnahmen führen zu signifikanten Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen, der Ressourceninanspruchnahme und der Landnutzung und schützen somit das Klima und die Biodiversität. Mit einer Circular Economy lassen sich Kosten für den Ausbau erneuerbarer Energien, den Netzausbau und den Import von Sekundärenergieträgern senken. Außerdem trägt die Circular Economy durch die Veränderung des Konsums in Deutschland zur Reduktion der globalen Umweltkosten bei. Zudem verringert sich die Abhängigkeit der Volkswirtschaft von kritischen Ressourcen nachhaltig.

Konsumbezogene Treibhausgasemissionen: Bei der Umsetzung des ambitionierten MDCE-Szenarios (Mix-Szenario) führen v.a. der veränderte Konsum und die verringerte Produktion in den analysierten Nachfragebereichen im Vergleich zum Baseline-Szenario zu 186 Mt CO_2-Äq (26 %) Einsparungen im Jahr 2045. Die Einsparungen entsprechen knapp 25 % der im Jahr 2021 in Deutschland emittierten Treibhausgasemissionen. Allein die drei Sektoren Hochbau, Fahrzeuge & Batterien und Lebensmittel & Ernährung machen ca. 79 % der Treibhausgasemissionseinsparungen aus. Weitere 18 % Treibhausgasemissionen lassen sich in den Sektoren Informations- und Kommunikationstechnologien/ Haushaltsgeräte (IKT/HH-Geräte) und Textilien einsparen. Mit nur fünf Maßnahmenbündeln lassen sich fast 84 % der Treibhausgasemissionseinsparungen in den betrachteten Sektoren realisieren. Diese Maßnahmenbündel beziehen sich auf die genannten Vermeidungsmaßnahmen und sind über viele Sektoren verteilt: Reduktion Wohn- und Bürofläche, Reduktion Individualverkehr, Planetary Health Diet, d.h. eine stärker pflanzenbasierte Ernährung, Ressourceneffiziente Rechenzentren und Reduktion Textilkonsum. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung mit Berücksichtigung des auftretenden Rebound-Effektes durch freiwerdendes Einkommen fällt die Einsparung der Treibhausgasemissionen geringer aus. Sie liegt dann zwischen 15 % und 23 % im Vergleich zur Baseline.

Endenergienachfrage und Treibhausgasemissionen bei der Industrietransformation: Auf die Industrie entfällt heute etwa rund ein Viertel des Endenergiebedarfs in Deutschland, was vor allem auf energieintensive Schlüsselindustrien und Prozesse wie die Stahl-, Zement- und Ethylen-Produktion zurückzuführen ist. Überträgt man das ambitionierte MDCE-Szenario (Mix-Szenario, siehe 3.1) von dem eigentlich betrachteten deutschen Konsum auf die deutsche Produktion in den Sektoren, so kann dies zu zusätzlichen Treibhausgasemissionseinsparungen von rund 10 % ggü. 1990 bzw. 26 Mt CO_2-Äq gegenüber der Baseline im Jahr 2045 beitragen. Diese Potenziale gehen über die bereits beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland hinaus. Durch die Wirkung der CE-Maßnahmen wird bei der Dekarbonisierung der deutschen Industrie im Jahr 2045 ein klarer Rückgang des Endenergieverbrauchs von 104 TWh (-17 %) im Jahr 2045 erreicht. Daraus lässt sich schließen, dass eine Circular Economy einen Beitrag zum Ziel einer CO_2-neutralen und wettbewerbsfähigen Wirtschaft leisten kann, denn ein niedrigerer Verbrauch an sekundären Energieträgern (z.B. Strom und Wasserstoff) kann kurzfristig Knappheiten entschärfen und langfristig die Kosten für den Ausbau erneuerbarer Energien, den Netzausbau und den Import von Sekundärenergieträgern senken.

Ressourceninanspruchnahme: Die Maßnahmen können im ambitionierten MDCE-Szenario den Rohstoffkonsum (RMC) um 179 Mt Rohstoffe (27 %) im Vergleich zur Baseline im Jahr 2045 reduzieren. Die höchsten Einsparpotenziale liegen aufgrund der Größe des gesamten Rohstoffkonsums im Bereich Hochbau, gefolgt von Fahrzeugen und Lebensmittel. In den drei Sektoren können somit insgesamt zwei Drittel des Einsparpotenzials beim Rohstoffkonsum realisiert werden. In den Bereichen IKT/HH-Geräte, Textilien und Tiefbau sind es zusammen weitere 27 %. Die modellierten CE-Maßnahmen bewirken einen stärkeren Rückgang bei abiotischen Rohstoffen, womit es zu einem

leichten prozentualen Anstieg im biotischen Bereich kommt. Insgesamt sinkt aber der Konsum von sowohl abiotischen als auch biotischen Rohstoffen durch die modellierten CE-Maßnahmen. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung unter Berücksichtigung des auftretenden Rebound-Effektes durch freiwerdendes Einkommen fällt die Reduktion des Rohstoffkonsums geringer aus. Sie liegt dann zwischen 12 % und 23 % im Vergleich zur Baseline.

Landnutzung und Biodiversität: Im Vergleich zur Baseline kann das ambitionierte MDCE-Szenario die Landnutzung im Jahr 2045 um 8,5 Mio. ha (30 %) reduzieren. Die CE-Maßnahmen bewirken somit Einsparungen von ca. 25 % der Gesamtfläche Deutschlands pro Jahr. Der Lebensmittelsektor hat hieran den größten Anteil; jedoch auch die Sektoren Fahrzeuge, Textilien und Hochbau tragen relevant zu Einsparungen bei. Alle Landnutzungsarten (Acker, Wald, Weide, andere) erfahren einen Rückgang in der Landnutzung. Die Ergebnisse verdeutlichen den großen Anteil des Lebensmittelsektors an den Gesamtentlastungspotenzialen aller Landnutzungsarten und unterstreichen den Einfluss der Reduktion von Fleisch- und Milchprodukten. Bei einer Umstellung auf eine Planetary-Health-Diet-konforme Ernährungsweise in Deutschland wird eine Reduzierung des Biodiversitätsverlustpotenzials von ca. 32 %im Mix-Szenario erreicht. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung unter Berücksichtigung des auftretenden Rebound-Effektes durch freiwerdendes Einkommen wird die Landnutzung weniger stark reduziert. Der Rückgang liegt dann zwischen 4 % und 21 % der Gesamtfläche Deutschlands.

Vermeidung externer Umweltkosten: Die CE-Maßnahmen würden durch die Veränderung des Konsums in Deutschland globale Umweltkosten von bis zu 157 Mrd. € vermeiden. Bei einer ganzheitlichen Betrachtung unter Berücksichtigung des auftretenden Rebound-Effektes durch freiwerdendes Einkommen beträgt die Höhe der vermiedenen globalen Umweltkosten 87 bis 134 Mrd. €. Die Berechnung bezieht sich auf die Monetarisierung der THG-Emissionen aus direkter Emission und veränderter Landnutzung (ohne Lebensmittel). Sie stellt aber einen unterschätzten Gesamtwert der Kostenvermeidungspotenzialen dar. Viele negative Aspekte wie Verlust der Biodiversität, Verschmutzung der Ökosysteme durch hohen Ressourcenverbrauch & Chemikalien, vorzeitige Sterblichkeit, Krankheiten und Verlust der Arbeitsproduktivität aufgrund von Luftverschmutzung, Naturkatastrophen sowie Überschwemmungen und Dürren verursachen weitere Kosten.

Kritikalität: Änderung im Bedarf bzw. Bereitstellung kritischer und stark umweltbelastender Rohstoffe: Im Ganzen betrachtet zeigt sich deutlich, dass die Resilienz der deutschen (oder europäischen) Wirtschaft gegenüber möglichen Versorgungsengpässen bei Rohstoffimporten durch die Circular Economy deutlich gestärkt werden kann. Über alle betrachteten Sektoren können mit der Umsetzung der modellierten CE-Maßnahmen insgesamt für 29 von 36 relevanten Rohstoffen eine Entspannung des Rohstoffbedarfs auf zweierlei Arten erreicht werden: Durch Reduktion des Bedarfs oder ein Mehrangebot an Sekundärrohstoffen. Das ausgeprägteste Entspannungspotenzial hinsichtlich der Versorgungssituation beim Rohstoffabbau ist dabei für Palladium, Yttrium, Dysprosium, Neodym, Terbium, Kobalt, Kupfer, Praseodym und Gallium (9 Rohstoffe) möglich, deren angenommener Bedarf für das Jahr 2045 gemäß Baseline zu mehr als +50 % durch die CE-Maßnahmen gedeckt werden kann. Dies ist insbesondere bedeutsam, da acht dieser neun Rohstoffe bereits heute von der EU als kritisch bezüglich ihrer Versorgungslage eingeschätzt werden. Kupfer, das als nicht-kritisch bewertet wird, bleibt jedoch aufgrund seiner Bedeutung für die digitale und grüne Transformation, die europäische Verteidigung und Raumfahrt zusammen mit der Erwartung einer stark steigenden Nachfrage als *strategischer* Rohstoff im Fokus. Fünf der neun Rohstoffe mit dem größten Veränderungspotenzial haben ein hohes Umweltgefährdungspotenzial, und zwar Kobalt, Kupfer, Neodym, Praseodym und Palladium. Das Umweltgefährdungspotenzial von Gallium, Dysprosium, Terbium und Yttrium wurde als mittel bis hoch eingeschätzt. Sofern die Nachfrage nach den Rohstoffen durch die CE-Maßnahmen reduziert werden kann, werden die mit den Rohstoffen einhergehenden

Umweltwirkungen gemildert. Somit kann die Circular Economy auch zu einer umfangreichen Reduktion der Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung und zum Erhalt der natürlichen Ressourcen beitragen.

Der gesamtgesellschaftliche Nutzen einer Circular Economy ist deutlich höher als die damit einhergehenden sozioökonomischen Kosten der Transformation. Die Studie zeigt die Notwendigkeit eines Strukturwandels in denjenigen Bereichen, die heute für große Umweltbelastungen verantwortlich sind. Somit liefert sie wichtige Impulse für einen gesellschaftlichen Dialog über die zukünftige Wirtschaftsstruktur, die die planetaren Grenzen respektieren.

Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf: Neben den positiven ökologischen Wirkungen sowie der Stärkung der Resilienz der deutschen Wirtschaft gegenüber möglichen Versorgungsengpässen bei Rohstoffimporten können durch die Circular Economy, je nach Sektor, sowohl positive als auch negative sozioökonomische Effekte auftreten. In der Studie führen die modellierten CE-Maßnahmen zu geringeren Ausgaben in den betrachteten Nachfragebereichen und somit zu monetären Einsparungen, die einem freiwerdenden Einkommen von 170 Mrd. € im ambitionierten MDCE-Szenario im Jahr 2045 entsprechen. Fließt das freiwerdende Einkommen in Dienstleistungen mit geringen Umweltintensitäten, z.B. aus den Bereichen Gesundheit, Bildung, Kultur und Freizeit, so steigen die Wertschöpfung und die Arbeitskräftebedarfe im Vergleich zur Baseline um 14 % bzw. 11 %. Wenn das freiwerdende Einkommen hingegen in Bereichen mit hohen THG-Emissionen, z.B. Fernreisen, oder für vermehrte Investitionsnachfrage (ohne Gebäude) ausgegeben wird, sinkt allerdings der ökologische Nutzen. Politikmaßnahmen etwa zur Vermeidung von negativen Umwelteffekten und zur Förderung von positiven soziökonomischen Entwicklungen, z.B. durch Investitionen in den Dienstleistungssektoren mit geringen Umweltintensitäten, können eine solche nicht intendierte Entwicklung verhindern oder abschwächen.

Positive Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarfe entstehen in denjenigen Bereichen, die aus Sicht einer Circular Economy zu Umweltentlastungen führen. Beispiele sind die Produktion von Sekundärrohstoffen, Anbau von Obst und Gemüse, Reparatur-Dienstleistungen, Unverpackt- und Mehrwegsysteme und Verkehrsdienstleistungen. Die wirtschaftlichen und sozialen Kosten treten in den betrachteten Sektoren v.a. infolge der Verringerung der Nachfrage auf. Die ermittelte Verringerung der Nachfrage in den betrachteten Sektoren ist auch darauf zurückzuführen, dass die modellierten CE-Maßnahmen auch viele R-Strategien mit Fokus auf Vermeidung abdecken. Folgende Bereiche sind von der Transformation negativ betroffen: die Primärproduktion, der Bergbau, die Lebensmittelproduktion und große Teile des verarbeitenden Gewerbes. Kosten entstehen insbesondere für diejenigen Teilbereiche, die im Sinne der Senkung der Umweltbelastungen und der gesellschaftlichen Kosten dringend umgestaltet werden müssen.

Die Wirkungsabschätzung bezieht sich auf die Nachfrage in neun Sektoren in Deutschland. Die mit der inländischen Nachfrage in diesen Sektoren verbundene Wertschöpfung und der damit einhergehende Arbeitskräftebedarf in Deutschland entspricht etwa 15 Prozent der gesamten Wertschöpfung und 20 Prozent des gesamten Arbeitskräftebedarfs. Dies liegt unter anderem daran, dass ein großer Teil der deutschen Wertschöpfung und des Arbeitskräftebedarfs auf die Produktion von Gütern für den Export zurückgeht. Weitere gesamtwirtschaftliche Wirkungen wie z.B. Innovationsef-

fekte, Preiseffekte, Wirkung auf den Außenhandel, zukünftige Investitionen wurden nicht in die Analyse einbezogen.[3] Die Ergebnisse sollten daher nicht als gesamtwirtschaftliche Folgenabschätzung einer Circular Economy für Deutschland interpretiert werden.

Die Studie stellt mit der Vielfalt der betrachteten Themen und komplexen Wirkzusammenhängen einen Meilenstein für den Circular Economy-Diskurs in Deutschland dar. Durch die Kombination von konsumseitigen Umweltfolgen und produktionsseitigen Perspektiven wird der große gesellschaftliche Nutzen einer Circular Economy ersichtlich. Vor dem Hintergrund großer ökologischer Herausforderungen wirft die Studie die Frage auf, ob der nur auf den Konsum materieller Güter und auf das Bruttoinlandsprodukt fokussierte Wohlstandsbegriff mit den Zielen der planetaren Grenzen überhaupt vereinbar ist. Die hohen Umwelt- und sozialen Kosten unserer derzeitigen Produktions- und Konsumweise beeinträchtigen die Lebensqualität der Menschen erheblich, erhöhen die Vulnerabilität gegenüber Katastrophen und Versorgungsunsicherheiten und gefährden somit auch den Wohlstand. Mit Blick für die globale Ressourcengerechtigkeit kann der hohe Ressourcenverbrauch in Deutschland nicht gerechtfertigt werden.

Mit ihrem breiten Verständnis der Circular Economy und der Bewertung von Maßnahmen, die auf Vermeidung fokussieren, liefert die Studie wichtige Impulse für einen gesellschaftlichen Dialog über die zukünftige Wirtschaftsstruktur. Die Studie zeigt die Notwendigkeit eines Strukturwandels in denjenigen Bereichen, die heute für große Umweltbelastungen verantwortlich sind. Die Akzeptanz eines entsprechenden Strukturwandels in der Gesellschaft kann allerdings nur dann gelingen, wenn die Zielkonflikte durch die sozialpolitische Flankierung eines breiten Instrumentenkastens adressiert und von einem offenen gesellschaftlichen Dialog über den notwendigen Strukturwandel begleitet werden. Wichtig ist dabei, die Zieldimension nicht aus den Augen zu verlieren. Das oberste Ziel ist der Schutz planetarer Lebensgrundlagen, wie auch im folgenden Satz formuliert: „*Ökologische Nachhaltigkeit ist nicht alles, aber ohne sie ist alles nichts*“ (Holzmann et al. 2022).

[3] Für die Analyse wurde ein offenes multiregionales Input-Output Mengenmodell mit Umwelterweiterungen genutzt.

Executive Summary

Resource consumption in Germany is at a very high level. In 2019, Germany consumed 30 % more resources than the global average. The extraction and processing of raw materials, as well as the use and disposal of goods produced from raw materials create or exacerbate many environmental problems such as intensification of climate change, loss of biodiversity, soil degradation and water scarcity. In particular, compliance with climate targets is not possible without a reduction in the consumption of raw materials, since a large share of Germany's greenhouse gases (around 40 %) is attributable to the extraction and processing of raw materials (UBA 2022b). In addition to exacerbating environmental problems, high raw material consumption is also a risk factor with regard to energy and raw material supply. It strengthens dependencies on other states, which is particularly problematic in politically unstable or autocratic regimes. Last but not least, in many cases, severe social and human rights problems go hand in hand with the extraction of raw materials.

In order to reduce its demand for raw materials, Germany needs to develop a comprehensive and systematic strategy on how the transition to a holistic circular economy can succeed. This study, conducted, as part of the **Model Germany Circular Economy (MDCE)** project of the WWF Germany, models the ecological and economic impact of a circular economy in Germany and thus produces a sound, scientific basis for deriving quantifiable targets and setting priorities.

This study is the first comprehensive study in the area of the circular economy in Germany**.** It covers:

- 9 sectors: vehicles and batteries, building construction and civil engineering, ICT and household appliances, food and nutrition, textiles, furniture, lighting and packaging,
- 63 circular economy measures: covering all R-Strategies[4],
- 7 impact categories: greenhouse gas emissions, resource use, land use, biodiversity, gross value added, labour demand and criticality/security of supply with raw materials,
- 1 hybrid model system with 4 different model types: Multiregional Input-Output Model (EE-MRIO), Life Cycle Assessment (LCA), Industry Simulation Model FORECAST and Material Flow Analysis (MFA).

The modelling considers the demand for nine defined sectors in Germany. These were selected because their production and use are associated with high environmental impacts, and they offer correspondingly high potential for benefits from circular economy (CE) measures[5].

The study shows that the transition to a circular economy is associated with substantial positive effects. The CE measures lead to significant savings in greenhouse gas emissions, resource use and land use and thus protect the climate and biodiversity. With a circular economy, costs for the renewable energies, grid expansion and the import of secondary energy carriers are reduced. In addition, the Circular Economy contributes to the reduction of global environmental costs by changing consumption in Germany. In addition, the dependence of the national economy on critical resources is reduced in the long term.

Consumption-related greenhouse gas emissions: In the implementation of the ambitious MDCE scenario (mix scenario), changed consumption and reduced production in the analysed demand sectors in particular lead to savings of 186 Mt CO_2-eq (26 %) in 2045 compared to the baseline. The

[4] 10 R-Strategies are: (1) Refuse, (2) Rethink, (3) Reduce, (4) Reuse, (5) Repair, (6) Refurbish, (7), Remanufacture, (8) Repurpose, (9) Recycle, (10) Recover

[5] see MDCE feasibility study, Prakash et al. (2022)]

savings correspond to almost 25 % of the greenhouse gas emissions emitted in Germany in 2021. Only three sectors, namely building construction, vehicles & batteries and food & nutrition, account for about 79 % of the GHG emission savings. A further 18 % of greenhouse gas emissions can be saved in the sectors of information and communication technologies/household appliances (ICT/ household appliances) and textiles. Only with 5 bundles of measures, almost 84 % of the greenhouse gas emission savings can be realised in the assessed sectors. These bundles of measures relate to the reduction measures and are distributed over many sectors: Reduction of residential and office space, reduction of private transport, Planetary Health Diet, i.e. more plant-based nutrition, resource-efficient data centres and reduction of textile consumption. In a holistic view with consideration of the occurring rebound effect through increased disposable income, the reduction of greenhouse gas emissions turns out to be lower. The remaining savings are between 15 % and 23 % in comparison to the baseline.

Final energy demand and greenhouse gas emissions in industrial transformation: Today, industry accounts for about a quarter of the final energy demand in Germany, which is mainly due to energy-intensive key industries and processes such as steel, cement, and ethylene production. By transferring the ambitious MDCE scenario from the German consumption to the production in Germany in the considered sectors, additional GHG emission savings of about 10 % compared to 1990 or 26 Mt CO_2-eq compared to the baseline in 2045 can be achieved. These potentials go beyond the climate protection measures already adopted in Germany. In the decarbonisation scenario in Germany in 2045, the CE measures lead to a decrease in final energy consumption of 104 TWh (-17 %) in 2045. Thus, it can be concluded that a circular economy can contribute to the goal of a CO_2-neutral and competitive economy, because lower consumption of secondary energy carriers (e.g., electricity and hydrogen) can alleviate shortages in the short term and reduce the costs for the renewable energies, grid expansion and the import of secondary energy carriers in the long term.

Resource use: In the ambitious MDCE scenario, the measures can reduce the raw material consumption (RMC) by 179 Mt of raw materials (27 %) compared to the baseline in 2045. Due to the volume of the total raw material consumption, the highest savings potentials are in the building construction sector, followed by vehicles and food. In these three sectors, a total of two thirds of the savings potential in raw material consumption can be realised. In the ICT/household appliances, textiles, and civil engineering sectors, further 27 % of savings can be achieved. The modelled CE measures cause a stronger decrease in abiotic raw materials, which leads to a slight percentage increase in the biotic area. Overall, however, the consumption of both abiotic and biotic raw materials decreases as a result of the modelled CE measures. When additionally considering the rebound effect through increase in disposable income, the decrease in resource use is lower. The remaining savings are between 12 % and 23 % in comparison to the Baseline.

Land use and biodiversity: Compared to the baseline, the ambitious MDCE scenario can reduce land use by 8.5 million ha (30 %) in 2045. The CE measures thus bring about savings of about 25 % of Germany's total land area per year. The food sector has the largest share in this, but the sectors of vehicles, textiles and building construction also contribute relevantly to savings. All land use types (arable land, forest, pasture, other) experience a decrease in land use. The results illustrate the large influence of the food sector on the total reduction potential of all land use types and underline the influence of the reduction of meat and dairy products. A switch to a Planetary Health Diet in Germany results in a reduction of the biodiversity loss potential of about 32 % in the mix scenario. When also considering the rebound effect through increased disposable income, the reduction in land use is lower. However, land use is still reduced by 4 % to 21 % compared to the Baseline.

Avoidance of external environmental costs: The CE measures would avoid global environmental costs of up to 157 billion € by changing consumption patterns in Germany. When also considering

the rebound effect through increased disposable income, avoided costs are still 87 to 134 billion Euros. The calculation refers to the monetisation of GHG emissions from direct emissions and land use change (excluding food). However, it represents an underestimation of the cost avoidance potentials. Many negative aspects, such as loss of biodiversity, ecosystem pollution due to high resource use & chemicals, premature mortality, diseases, and loss of labour productivity due to air pollution, natural disasters such as floods and droughts, cause further costs.

Criticality: Change in the demand or supply of critical and highly polluting raw materials: Overall, it is clear that the resilience of the German (or European) economy against the bottlenecks in raw material supplies and imports can be significantly strengthened by the circular economy. Across all the sectors considered, the implementation of the modelled CE measures can reduce the dependencies on raw materials for a total of 29 out of 36 relevant raw materials by reducing demand or increasing supply through recycling. The most pronounced easing of the supply situation in raw material extraction is possible for palladium, yttrium, dysprosium, neodymium, terbium, cobalt, copper, praseodymium, and gallium (9 raw materials), whose demand assumed for 2045 in the baseline can be covered to more than +50 % by the CE measures. This is particularly significant as eight of these nine raw materials are already assessed by the EU as critical in terms of their supply situation. Copper, although assessed as non-critical by the EU but expected to experience a strong increase in demand, continues to be extremely important as a strategic commodity for the digital and green transformation, European defence and space. Five of the nine commodities with the greatest potential for change (cobalt, copper, neodymium, praseodymium, and palladium) have a high environmental hazard potential. The environmental hazard potential of gallium, dysprosium, terbium, and yttrium was assessed as medium to high. If the demand for the raw materials can be reduced through CE measures, the associated environmental impacts are consequently mitigated. Thus, the circular economy can also contribute to a comprehensive reduction of the environmental impacts of raw material provision and to the conservation of natural resources.

The overall societal benefits of a circular economy are significantly higher than the associated socio-economic costs. The study shows the need for a structural change in those sectors that are responsible for major environmental burdens today. Thus, it provides important impulses for a social dialogue on the future economic structure that respects planetary boundaries.

Gross value added and labour demand: In addition to the positive ecological effects and the strengthening of the resilience of the German economy to possible supply bottlenecks in raw material imports, both positive and negative socio-economic effects can occur as a result of the circular economy, depending on the sector. The economic and social benefits arise from the fact that the CE measures lead to lower expenditure in the demand areas considered and thus to monetary savings, which correspond to a resulting increased disposable income of 170 billion € in the ambitious MDCE-scenario in 2045. If the disposable income flows into services with low environmental intensities, e.g. from the areas of health, education, culture and leisure, value added and labour requirements increase by 14 % and 11 %, respectively, compared to the baseline. If, on the other hand, the increased disposable income is spent in areas with high GHG emissions, e.g. long-distance travel, or increased investment demand (excluding buildings), the ecological benefit decreases. Policy measures to avoid negative environmental effects and to promote positive socio-economic developments, e.g. by investing in the service sectors with low environmental intensities, can prevent or mitigate such unintended development.

Positive gross value added and labour requirements arise in those areas that lead to environmental relief from the perspective of a circular economy. Examples are the production of secondary raw materials, the cultivation of fruit and vegetables, repair services, non-packaging and reusable systems and transport services. The economic and social costs occurring in the considered sectors are mainly a result of the reduction in demand. The identified reduction in demand in the considered sectors is also due to the fact that the modelled CE measures also cover many R-strategies focusing on consumption reduction. The following economic sectors are negatively affected by the transformation: primary production, mining, food production and a large part of manufacturing sectors. The costs arise in particular for those sub-sectors that are strongly affected by the CE transformation, but urgently need to be redesigned in the sense of reducing environmental impacts and social costs.

The modelling addresses the demand for nine defined sectors in Germany. The value added and the labour demand in Germany associated with domestic demand in these sectors corresponds to about 15 percent of total value added and 20 percent of total labour demand. This is partly because a large part of Germany's gross value addition and labour demand is related to the production of goods for export. Other macroeconomic effects such as innovation effects, price effects, effects on foreign trade, future investments were not included in the analysis.[6] The results should therefore not be interpreted as a macroeconomic impact assessment of a circular economy for Germany.

The study represents a milestone for the circular economy discourse in Germany with the diversity of the topics considered and the complex interactions of effects. Through the combination of consumption-side environmental impacts and production-side perspectives, the major social benefits of a circular economy become apparent. Against the backdrop of major ecological challenges, the study raises the question of whether the concept of well-being, which focuses only on the consumption of material goods and only on gross domestic product, is at all compatible with the goals of planetary boundaries. The high environmental and social costs of our current production and consumption patterns significantly impair people's quality of life, increase vulnerability to disasters and food insecurity, and thus also endanger prosperity. With a view to global resource justice, the high resource consumption in Germany cannot be justified.

With its broad understanding of the circular economy and the assessment of measures based on consumption reduction, the study provides important impulses for a social dialogue on the future structure of the economy. The study shows the necessity of a structural change in those sectors that are responsible for major environmental burdens today. However, the acceptance of a corresponding structural change in society can only succeed if the conflicting goals are addressed through the socio-political flanking of a broad set of instruments and are accompanied by an open social dialogue on the necessary structural change. At the same time, it is important not to lose sight of the target dimension. The primary goal is the protection of planetary life-support systems, as formulated in the following sentence: "*Ecological sustainability is not everything, but without it everything is nothing*" (Holzmann et al. 2022).

[6] An open multi-regional input-output quantity model with environmental extensions was used for the analysis.

Danksagung

An der Realisierung des Projektes **„Modell Deutschland Circular Economy“** waren zahlreiche Personen des WWF Deutschland aus den unterschiedlichsten Bereichen beteiligt. Ihnen allen möchten wir unseren Dank aussprechen für die Begleitung des Projektes, für inhaltliche Impulse, konstruktive Anregungen und für die gute Zusammenarbeit. Unser besonderer Dank gilt:

- Rebecca Tauer, Programmleitung Circular Economy
- Jonas Aechtner, Senior Project Manager Circular Economy
- Silke Düwel-Rieth, Director Sustainable Business & Markets
- Matthias Kopp, Head Sustainable Finance
- Viviane Raddatz, Fachbereichsleiterin Klimaschutz und Energiepolitik
- Dr. Rolf Sommer, Fachbereichsleiter Landwirtschaft & Landnutzungswandel
- Tom Ohlendorf, Senior Manager Circular Economy focus on Packaging
- Silke Küstner, Project Manager Circular Economy
- Lisa-Maria Okken, Policy Advisor Climate & Energy
- Michael Berger, Referent für nachhaltige Landwirtschaft und Ressourcennutzung
- Dr. Susanne Winter, Programmleiterin Wald
- Laura Prill, Project Manager Sustainable Timber and Paper
- Tobias Kind-Rieper, Global Lead Mining & Metals
- Rebekka Adkins, Referentin Nachhaltige und gesunde Ernährung
- Laura Griestop, Senior Manager Sustainable Business & Markets (Plastics)
- Maren Hundhammer, Sustainability Consultant
- Christian Landenberger, Advisor Sustainable Finance
- Sebastian Breer, Policy Advisor Climate and Energy
- Elisa Kollenda, Referentin Nachhaltige Ernährung und ökologischer Fußabdruck
- Esther Laabs, Projektmanagerin Rohstoffe & Batterien

Nicht zuletzt danken wir Sara Holzmann, Marcus Wortmann und Armando García Schmidt von der Bertelsmann Stiftung für ihre wertvollen Beiträge und Hinweise.

1 Hintergrund

Eine wachsende Weltbevölkerung und die immer ressourcenintensivere Lebensweise der Menschen haben in den letzten 50 Jahren zu mehr als einer Verdreifachung des weltweiten Ressourcenbedarfs geführt (UBA 2022b). Dieser bewegt sich damit momentan auf einem Niveau, welches nicht vereinbar ist mit der Einhaltung planetarer Grenzen. Dies gilt in besonderem Maße für Deutschland, welches als stark industrialisiertes Land um 30 % mehr Ressourcen verbraucht als der globale Durchschnitt (im Jahr 2019, (UBA 2022b). Bemühungen um mehr Effizienz haben zwar dazu geführt, dass der Rohstoffkonsum Deutschlands in den letzten Jahren nicht weiter angestiegen ist (UBA 2022b), dies ist aber nicht ausreichend, um innerhalb der planetaren Grenzen zu wirtschaften.

Die Entnahme und Aufbereitung von Rohstoffen sowie die Nutzung und Entsorgung der aus Rohstoffen produzierten Güter schafft oder verschärft viele **Umweltprobleme**. Um eine Zerstörung unserer Lebensgrundlagen durch Klimawandel, Wassermangel, Flächenverbrauch, Artensterben und weitere Umweltproblematiken zu verhindern, ist vielmehr eine konsequente **absolute Reduktion unseres Rohstoffbedarfs** notwendig. Insbesondere ist die Einhaltung der Klimaziele ohne eine Reduktion des Rohstoffverbrauchs nicht möglich, da ein großer Anteil der Treibhausgase Deutschlands von etwa 40 % auf die Entnahme und Verarbeitung von Rohstoffen zurückzuführen ist (UBA 2022b).

Neben der Verschärfung von Umweltproblematiken ist ein hoher Rohstoffverbrauch auch ein **Risikofaktor hinsichtlich der Energie- und Rohstoffversorgung**. Er stärkt Abhängigkeiten von anderen Staaten, was insbesondere bei politisch instabilen oder autokratischen Regimes problematisch ist. Nicht zuletzt bieten **die sozialen und menschenrechtlichen Probleme**, die mit der Extraktion von Rohstoffen einhergehen (z.B. durch schlechten Schutz der Minenarbeiter*innen und der benachbarten Gemeinden), ein Argument dafür, dass der Rohstoffbedarf Deutschlands reduziert wird.

Um seinen Rohstoffbedarf zu senken, muss Deutschland eine umfassende und systematische Strategie entwickeln, wie der Übergang zu einer ganzheitlichen Circular Economy gelingen kann (WWF Deutschland, Wuppertal-Institut 2021). In diesem Sinne beinhaltet der Koalitionsvertrag der Bundesregierung ein klares Bekenntnis für eine Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). Der politische Prozess zur Entwicklung der NKWS hat offiziell im April 2023 begonnen. Es ist vorgesehen, die NKWS im Frühjahr 2024 im Kabinett zu beschließen. Laut dem Koalitionsvertrag der Bundesregierung wird dabei angestrebt, klare Ziele und Vorgaben für die Kreislaufwirtschaft zu definieren.

Allerdings fehlt bisher eine fundierte, wissenschaftliche Grundlage zur Ableitung von quantifizierbaren Zielen, Festlegung von Prioritäten und eine ganzheitliche Folgenabschätzung einer Circular Economy in Deutschland. Mit „**Modell Deutschland Circular Economy (MDCE)“** hat WWF Deutschland ein ambitioniertes und umfangreiches Vorhaben initiiert, das auf der Grundlage der Modellierung von ökologischen und ökonomischen Wirkungen einer Circular Economy Impulse für die konkrete Gestaltung der NKWS liefern soll. Das MDCE-Vorhaben soll relevanten Akteuren, vor allem in der Politik, ein potenzielles, umfassendes Bild einer Circular Economy in Deutschland aufzeigen und schildern, mit welchen Politikinstrumenten die wirkungsvollsten Circular Economy-Maßnahmen (CE-Maßnahmen) umgesetzt werden können. Das MDCE-Vorhaben besteht aus drei Komponenten:

- **MDCE-Machbarkeitsstudie**, welche die methodischen und fachlichen Grundlagen für das Gesamtvorhaben darlegt (Prakash et al. 2022). Darin wird gezeigt, an welchen Stellen in der Circular Economy priorisiert werden muss und welche Sektoren, Produkte und Materialien dies begünstigen können. Außerdem wird aufgezeigt, welche CE-Maßnahmen in den einzelnen Sektoren den größten Einfluss haben können. Es wird dargelegt, welche Wirkungen sich für Umwelt, Wirtschaft und Soziales ergeben (Näheres siehe „Zielsetzung der Studie“, Kapitel 2).

- **MDCE-Modellierungsstudie**: Der hier vorliegende Bericht bezieht sich auf die Modellierung von in der MDCE-Machbarkeitsstudie identifizierten CE-Maßnahmen zur ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzung (siehe Abschnitt 3.1 für die Zielsetzung).
- **MDCE-Politik Blueprint**: An die Modellierung schließt sich ein Blueprint für die Politik an (Prakash et al. 2023). Dieses enthält Empfehlungen für konkrete Ziele und beschreibt, mit welchen konkreten politischen Instrumente und Strukturen die modellierten CE-Maßnahmen umgesetzt werden können. Der MDCE-Blueprint gibt Hinweis sowohl für die Politik als auch für wirtschaftliche und gesellschaftliche Akteure, wie sie ambitioniert und verbindlich handeln können.

2 Zielsetzung der Studie

Das übergeordnete Ziel der hier vorliegenden Studie (**MDCE-Modellierungsstudie**) ist die Modellierung von ausgewählten CE-Maßnahmen in neun Sektoren in Deutschland zur ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzung. Ganz konkret untersucht die Studie folgende Fragestellungen:

- Potenziale von CE-Maßnahmen für den Klima-, Ressourcen-, und Biodiversitätsschutz,
- Potenziale von CE-Maßnahmen bei der Industrietransformation in Deutschland auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität im Jahr 2045,
- Auswirkungen von CE-Maßnahmen auf sozioökonomische Indikatoren, wie Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf, inkl. struktureller Effekte,
- Potenziale von CE-Maßnahmen zur Stärkung der Versorgungssicherheit mit Rohstoffen sowie zur Reduktion der mit dem Rohstoffabbau verbundenen ökologischen Wirkungen,
- Potenziale von CE-Maßnahmen zur Vermeidung von volkswirtschaftlichen Folgekosten beizutragen.

Die Analyse struktureller Effekte bei Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf, der Versorgungssicherheit sowie der Vermeidung von volkswirtschaftlichen Folgekosten dient in Summe einer **Kosten-Nutzen-Abwägung** der Umsetzung der betrachteten CE-Maßnahmen.

Insgesamt stellt das Projekt eine Abschätzung der Potenziale von CE-Maßnahmen mit Blick auf das Jahr 2045 dar. Hierbei werden alle „R-Strategien“ der Circular Economy einbezogen. Der Fokus der CE-Maßnahmen liegt allerdings auf den oberen Abfallhierarchiestufen. Bei der Auswahl von CE-Maßnahmen wurden solche mit Fokus auf Vermeidung, Wiederverwendung und Reparaturen prioritär gegenüber Recycling, energetische Verwertung und Beseitigung behandelt.

Der Fokus des MDCE-Vorhabens liegt auf neun abgegrenzten Sektoren, deren Gütergruppen in Produktion und Nutzung mit hohen Umweltbelastungen verbunden sind und entsprechend hohe Potenziale für Nutzen aus CE-Maßnahmen bieten (Herleitung in der MDCE-Machbarkeitsstudie, Prakash et al. 2022). Der Fokus der Studie liegt dabei im Sinne eines ökologischen Fußabdrucks auf der inländischen Nachfrage mit einem Schwerpunkt auf dem privaten Konsum, wohingegen Potenziale der Circular Economy in der Produktion von Gütern für den Export nicht mitberücksichtigt sind. Die mit der inländischen Nachfrage nach diesen Gütern verbundene Wertschöpfung und der entsprechende Arbeitskräftebedarf in Deutschland entspricht etwa 15 Prozent der gesamten Wertschöpfung und 20 Prozent des gesamten Arbeitskräftebedarfs. Dies liegt unter anderem daran, dass ein großer Teil der deutschen Wertschöpfung und des Arbeitskräftebedarfs auf die Produktion von Gütern für den Export zurückgeht.

Neben den Umweltwirkungen wurden im MDCE-Vorhaben auch sozioökonomische Effekte betrachtet. Im Gegensatz zu den ökologischen Indikatoren, die global betrachtet wurden, werden die sozioökonomischen Indikatoren nur für Deutschland ausgewiesen. Die Ergebnisse zeigen, wie sich eine Änderung der inländischen Nachfrage der in der MDCE-Modellierungsstudie betrachteten Güter auf Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf der Wirtschaftsbereiche in Deutschland auswirkt, die direkt und indirekt an deren Produktion beteiligt sind. In der Studie werden die Effekte, die außerhalb der in der Studie betrachteten Sektoren auftreten können, aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen und unvorhersehbarer Entwicklungen nur teilweise berücksichtigt. Beispiele sind Preiseffekte, Innovationseffekte, Wirkung auf den Außenhandel, zukünftige Investitionen und Multiplikatorwirkungen. Aufgrund dieser methodischen Einschränkungen und der Eingrenzung auf die inländische Nachfrage sollten **die Ergebnisse nicht als gesamtwirtschaftliche Folgenabschätzung einer Circular Economy für Deutschland interpretiert werden**.

3 Methodisches Vorgehen

Die Modellierung der ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzung einer Circular Economy umfasste mehrere Schritte:

- Entwicklung von verschiedenen Szenarien für MDCE-Szenarien (3.1);
- Bestimmung der Ausprägung von CE-Maßnahmen aus der MDCE-Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022) in den MDCE-Szenarien (Siehe 3.1, Abbildung 3-1):
- Tabelle 3-1))
- Konsolidierung der CE-Maßnahmen (Siehe 3.2)
- Entwicklung von Wirkmodellen für die Modellierung, Datensammlung und Impulsaufbereitung (3.4)
- Durchführung der Modellierung (3.5)

In den folgenden Abschnitten ist das methodische Vorgehen ausführlicher dargestellt.

3.1 Szenario-Entwicklung

Kurzbeschreibung

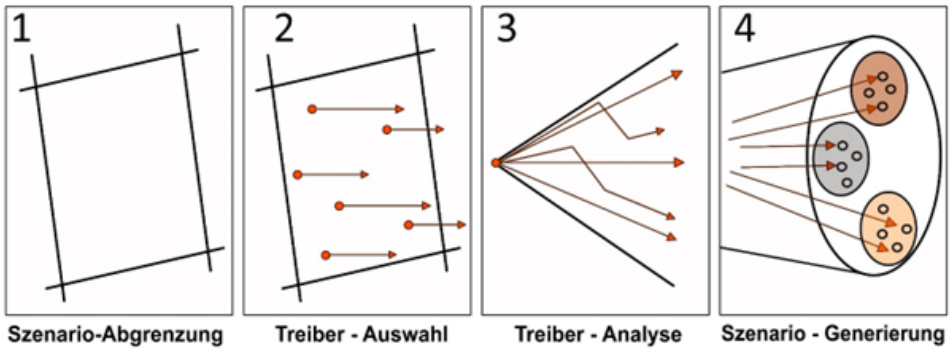
Szenarien sind ein weit verbreitetes Mittel in Wissenschaft und Praxis, um sich mit der Zukunft produktiv auseinander zu setzen. Einem explorativen Ansatz folgend und in Anlehnung an Gausemeier et al. (1998) und Wiek et al. (2006) werden Szenarien als plausible und konsistente Beschreibungen möglicher Zukünfte, die auf Annahmen basieren, wie sich die entscheidenden Schlüsseltreiber im gegebenen Zeitraum entwickeln, definiert. **Schlüsseltreiber** sind Faktoren, die einen großen Einfluss auf das zu untersuchende Zielsystem haben und dadurch die relevantesten Rahmenbedingungen der zukünftigen Entwicklung repräsentieren.

Die MDCE-Szenarien sollen zeigen, in welchem Ausmaß verschiedene CE-Maßnahmen in Deutschland bis ins Jahr 2045 unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen umgesetzt werden können und welche ökonomischen und ökologischen Auswirkungen sich daraus ergeben. Ein Szenario besteht also immer sowohl aus einer Beschreibung zentraler Rahmenbedingungen – die dadurch repräsentiert werden, wie sich die Schlüsseltreiber entwickelt haben – als auch aus einem dazu passenden Bündel an CE-Maßnahmen, welche in verschiedenen Ausmaßen umgesetzt wurden.

Laut Wiek et al. (2006) erfolgt die Entwicklung von explorativen Szenarien in folgenden Schritten:

1. In der Szenario-Abgrenzung werden die Ziele des Prozesses definiert und darauf aufbauend der zeitliche, räumliche und inhaltliche Rahmen der Szenarien abgesteckt.
2. In der Treiber-Auswahl gilt es, die wichtigsten Schlüsseltreiber für die zukünftige Entwicklung des Zielsystems zu bestimmen.
3. In der Treiber-Analyse werden unterschiedliche Möglichkeiten erarbeitet, wie sich die einzelnen Schlüsseltreiber im gegebenen Zeitraum unter verschiedenen Umständen entwickeln können.
4. In der Szenario-Entwicklung (Szenario-Generierung) werden schließlich die verschiedenen Entwicklungen der Schlüsseltreiber zu mehreren konsistenten Szenarien kombiniert und die Szenarien werden in Detail beschrieben.

Abbildung 3-1: Schritte der Szenario-Entwicklung



Quelle: abgeändert nach ITZ 2008

Die Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte für die Entwicklung von MDCE-Szenarien passierte – leicht adaptiert – wie folgt:

Die **Abgrenzung der Szenarien** erfolgte im Rahmen der Erstellung der Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022) und einiger projektinternen Diskussionen im Sommer 2022. Hier wurde der generelle explorative Ansatz festgelegt und der zeitliche, räumliche und inhaltliche Rahmen definiert (Freyer et al. 2005):

- Zeitlich: Jahr 2045;
- Räumlich: Global für Umweltwirkungen und Deutschland für sozioökonomische Effekte;
- Inhaltlich: Umsetzung von CE-Maßnahmen unter verschiedenen Rahmenbedingungen.

Die Grundlagen für die **Treiber-Auswahl** und **Treiber-Analyse** wurde durch Recherchen der Sektorexpert*innen des Projektteams erarbeitet. Ziel dieser Recherche war es, Faktoren zu identifizieren, die einen großen Einfluss auf die Umsetzung der CE-Maßnahmen haben. Im Zuge dieser Recherchen wurden acht mögliche Schlüsseltreiber[7] identifiziert und näher beschrieben. Nach einer Evaluation und Bewertung dieses ersten Vorschlags wurden schlussendlich **vier Schlüsseltreibern** ausgewählt, die die wichtigsten Rahmenbedingungen repräsentieren. Im Folgenden sind die vier Schlüsseltreiber kurz zusammengefasst:

- **Produktionsseitige Ambitionen der Politik:** Umfasst die Ausgestaltung und Implementierung aller Typen von Politikinstrumenten (autoritär, monetär, informativ), die darauf abzielen, Produktion von Gütern und Dienstleistungen nachhaltiger zu gestalten;
- **Konsumseitige Ambitionen der Politik**: Umfasst die Ausgestaltung und Implementierung aller Typen von Politikinstrumenten (autoritär, monetär, informativ), die darauf abzielen, den Konsum von Gütern und Dienstleistungen nachhaltiger zu gestalten;
- **Technologischer Fortschritt:** Das allgemeine technologische Niveau – nicht nur beschränkt auf CE-Maßnahmen – insbesondere das Ausmaß von Digitalisierung. Der Treiber zeigt an, wie schnell sich Schlüsseltechnologien in den jeweiligen Sektoren entwickeln könnten.

[7] Ambitionen der Klima-, und Ressourcenpolitik bzw. des Rechts; Ausgestaltung des Steuersystems, politische Maßnahmen für Verhaltensänderung; Konsumverhalten, technologische Entwicklung; Kaufkraft der Bevölkerung; Rohstoffverbrauch; Treibhausgasemissionen

- **Konsumverhalten:** Konsumverhalten der Bevölkerung in Deutschland, beeinflusst durch Kaufkraft und Lebensstile. Bei den Lebensstilen reicht das Spektrum von Suffizienz (d.h. Selbstbegrenzung des Konsums zwecks Berücksichtigung natürlicher Grenzen) bis zu Hedonismus (keinerlei Selbstbegrenzung).

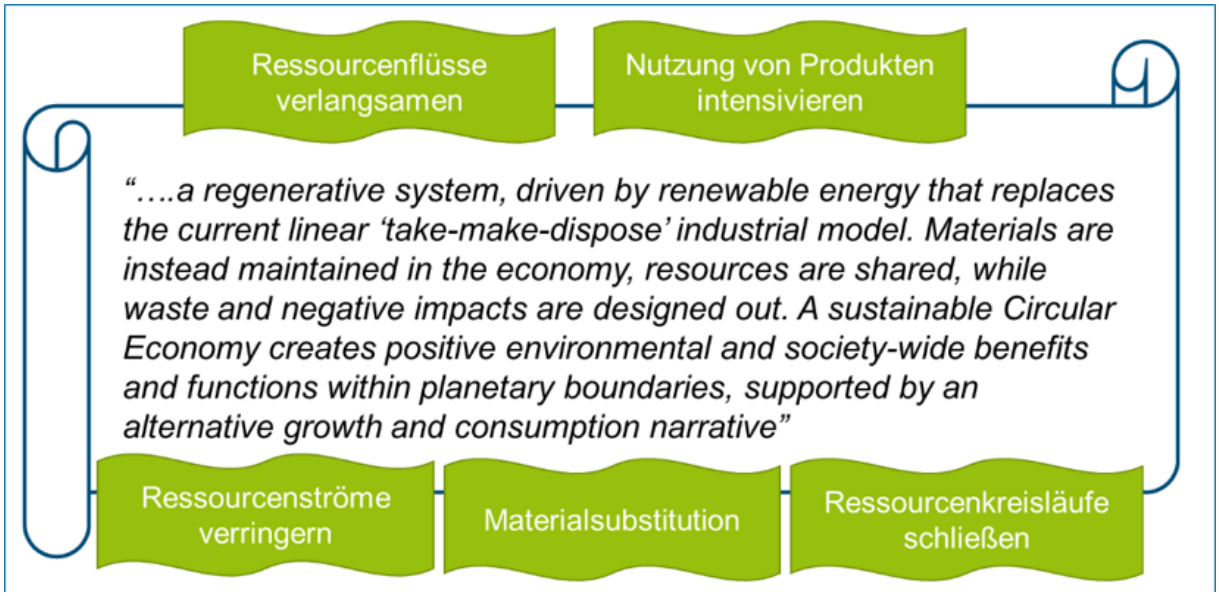
Darauf aufbauend wurde die **Treiber-Analyse** und eine erste **Szenario-Entwicklung** durchgeführt. Insgesamt wurden zunächst sechs mögliche Szenarien entworfen, in denen die vier Schlüsseltreiber jeweils unterschiedlich ausgeprägt sind.[8] Die sechs Szenarien wurden im Zuge der Konsolidierung in **vier Szenarien** zusammengefasst.

Im nächsten Schritt fand die **Zuordnung aller CE-Maßnahmen den vier Szenarien** durch die jeweiligen Sektorexpert*innen des Projektteams statt. Hier wurde die Passfähigkeit bzw. die **Ausprägung der CE-Maßnahmen** zu den Rahmenbedingungen der jeweiligen Szenarien bewertet. Je passfähiger eine Maßnahme ist bzw. je stärker deren Ausprägung ist, desto ambitionierter wird sie in dem jeweiligen Szenario umgesetzt (siehe „CE-Maßnahmen und deren Ausprägung“ im Kapitel 7.2). Da die Rahmenbedingungen für die Etablierung für Circular Economy in jedem erstellten Szenario anders ausgeprägt sind, werden auch die Schwerpunkte der fünf großen Handlungsstrategien zur Verfolgung der Ziele einer Circular Economy unterschiedliche gelagert sein. Die Handlungsstrategien wurden aus der Definition der Circular Economy vom WWF (2020) abgeleitet, siehe auch die MDCE-Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022):

- Die Verringerung von Ressourcenströmen, beispielsweise durch die absolute Vermeidung unnötiger Produkte und den effizienteren Einsatz von Materialien, damit weniger Ressourcen pro Produktionseinheit benötigt werden;
- Die Substitution von Material, beispielsweise durch den Einsatz erneuerbarer Rohstoffe sowie technischer Innovationen, wo dies ökologisch und sozial sinnvoll ist;
- Die Verlangsamung von Ressourcenflüssen, beispielsweise durch eine längere Nutzung von Produkten, Wiederverwendung, Reparatur und langlebiges Design;
- Die Intensivierung der Produktnutzung, beispielsweise durch Maßnahmen, wie das Teilen bzw. die gemeinsame Verwendung von Produkten;
- Die Schließung von Ressourcenkreisläufen, beispielsweise durch hochwertiges Recycling, das sich über technische Lösungen sowie verstärktes Sammeln erreichen lässt.

[8] “Baseline Szenario”; “Staatliche Einflussnahme und Lenkung”; “Freiwilligkeit und private Initiative”; “Technische Lösungen”; “Verhaltensänderungen”; “Mix-Szenario”

Abbildung 3-2: Definition von Circular Economy und Darstellung der fünf Handlungsstrategien



Quelle: Eigene Darstellung; nach WWF (2020)

Die Ergebnisse wurden im Gesamtprojektteam und mit WWF diskutiert und nachgeschärft. Anschließend erfolgte eine finale Zuordnung der CE-Maßnahmen in den vier Szenarien.

Zusammengefasst sollen die MDCE-Szenarien zeigen, in welcher Form unterschiedliche CE-Maßnahmen in Deutschland bis zum Jahr 2045 unter verschiedenen Rahmenbedingungen umgesetzt werden könnten.

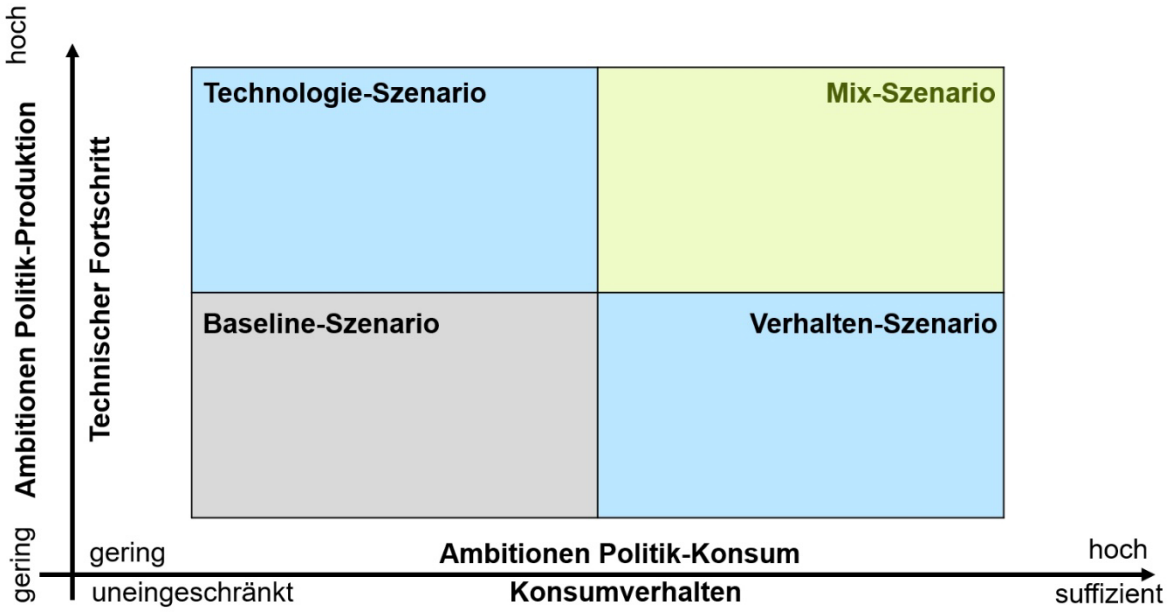
Um die Ziele von MDCE zu erfüllen, dürften die erstellen explorative Szenarien nicht komplett frei sein, sondern müssen folgende Kriterien entsprechen:

- **Realitätsnähe:** Szenarien dürfen keine realitätsfernen Utopien oder Dystopien beschreiben, sondern Entwicklungspfade beschreiben, die ohne dramatische Umbrüche zumindest theoretisch möglich sind.
- **Fokus auf CE-Maßnahmen:** Die berechneten ökologischen und ökonomischen Wirkungen der MDCE-Szenarien sollen sich im Vergleich zu einer Fortschreibung des Status quo Großteils durch die Um-, bzw. Nicht-Umsetzung von CE-Maßnahmen ergeben und nicht durch den Wandel von Rahmenbedingungen.
- **Vergleichbarkeit:** Dieses Kriterium hängt stark mit der Maßnahmenzentriertheit zusammen. Die Szenarien sollen untereinander dahingehend vergleichbar sein, inwieweit sich die Auswirkungen der jeweils umgesetzten CE-Maßnahmen unterscheiden. Die unterschiedlichen Wirkungen sollen nicht durch Änderungen in den Rahmenbedingungen, die in den jeweiligen Szenarien angenommen werden, verdeckt werden.

Vier Szenarien für 2045

Die folgende Abbildung fasst die im Rahmen dieser Studie entwickelten vier MDCE-Szenarien zusammen:

Abbildung 3-3: Zusammenfassung MDCE-Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung.

Im **Baseline-Szenario** werden weitgehend die Entwicklung des Projektionsberichts 2021 (Repenning et al. 2021) angenommen. Das bedeutet, Konsumverhalten und technologischer Fortschritt entwickeln sich gemäß bisherigen Trends, und es werden sowohl produktions- als auch konsumseitig lediglich bereits angekündete Maßnahmen umgesetzt.

Im **Technologie-Szenario** liegt der Fokus auf technischen und produktionsseitigen Lösungen. Es gibt klare Ambitionen der Politik, angenommene Produktionsprozesse zu optimieren und effizienter zu gestalten. Diese Ambitionen gehen mit einem raschen technologischen Fortschritt einher.

Im Kontrast dazu fokussiert sich die Politik im **Verhalten-Szenario** auf eine nachhaltige Gestaltung des Konsums, die auch mit tatsächlichen Änderungen des Konsumverhaltens einhergeht. Produktionsseitige Lösungen werden vernachlässigt und der technische Fortschritt schreitet vergleichsweise langsam voran.

Schließlich wird im **Mix-Szenario** angenommen, dass die Politik hohe Ambitionen zeigt, die Wirtschaft sowohl produktions-, als auch konsumseitig nachhaltiger zu gestalten. Dieses Engagement geht mit einem rasanten technologischen Fortschritt und Änderungen im Konsumverhalten einher.

In der folgenden Tabelle 3-1 werden die vier MDCE-Szenarien mit den jeweiligen Schlüsseltreibern zusammenfassend dargestellt. Ausführliche **Narrativen** zu den vier Szenarien befindet sich in den Narrative der vier MDCE-Szenarien (Kapitel 7.3):

Tabelle 3-1: Kurzbeschreibung der Entwicklung der einzelnen Schlüsseltreibern in den vier MDCE-Szenarien

Schlüsseltreiber	Baseline-Szenario	Technologie-Szenario	Verhalten-Szenario	Mix-Szenario
Politik Produktion	Großteils Beibehaltung des Status quo. Zusätzlich erfolgt eine moderate Umsetzung von bereits angekündigten CE-Maßnahmen; Der Fokus liegt auf Subventionen	Politik fördert Innovationen stark (allerdings nicht um Produktion zu begrenzen, sondern effizienter zu machen). Ziel ist es die technischen Potenziale in der Produktion auszuschöpfen; Monetäre Maßnahmen und Ordnungsrecht werden nur zurückhaltend eingesetzt	Technologischer Fortschritt wird nicht zusätzlich durch Politik gefördert; stattdessen wird die Serviceorientierung der Produktionsprozesse gefördert; d.h., die Politik ergreift Maßnahmen, um Produkte langlebiger zu machen (wachstumsdämpfende Maßnahmen)	Umfangreicher Mix an Politikmaßnahmen, um Produktion nachhaltiger zu gestalten: z.B. Förderung technischer Innovationen; Maßnahmen, um Langlebigkeit der Produkte zu erhöhen
Politik Konsum	Großteils Beibehaltung des Status quo. Zusätzlich erfolgt eine moderate Umsetzung von bereits angekündigten CE-Maßnahmen; Der Fokus liegt auf weichen Maßnahmen	Entwicklung wie Baseline-Szenario; Wenig Eingriffe in Konsum und Geschäftsmodelle	Nachhaltiger Konsum wird stark über Ordnungsrecht und Fiskalpolitik gefördert	Umfangreicher Mix an Politikmaßnahmen, um den Konsum nachhaltiger zu gestalten
Technologischer Fortschritt	Digitalisierung und Schlüsseltechnologien die 2020 bereits eine bestimmte Reife erzielt haben, setzen sich zunehmend durch	Es kommt zu einem großen technischen Fortschritt in allen für Kreislaufwirtschaft relevanten Schlüsseltechnologien	Der technologische Fortschritt geht langsamer voran als im Baseline-Szenario; Bei manchen CE-Maßnahmen geht der Fortschritt schneller voran, da der Klimaschutz dies erfordert	Großer technischer Fortschritt
Konsumverhalten	Sehr moderater Trend in Richtung mehr Bedeutung von Nachhaltigkeit als Kaufentscheidung; Stagnation der Kaufkraft	Ähnliche Entwicklung wie das Baseline-Szenario (moderater Trend in Richtung nachhaltigerer Konsum)	Es gibt einen deutlichen Wandel des Konsumverhaltens hin zu mehr Sharing, Reparatur und Suffizienz	Wandel des Konsumverhaltens hin zu mehr Suffizienz

Quelle: Eigene Darstellung.

In den MDCE-Szenarien werden die CE-Maßnahmen unterschiedlich ambitioniert umgesetzt. Eine genaue Zuordnung aller Maßnahmen in den jeweiligen Sektoren und deren Ausprägung zu den einzelnen Szenarien befindet sich im Anhang (siehe 7.2 Sektorspezifische Modellierungsparameter).

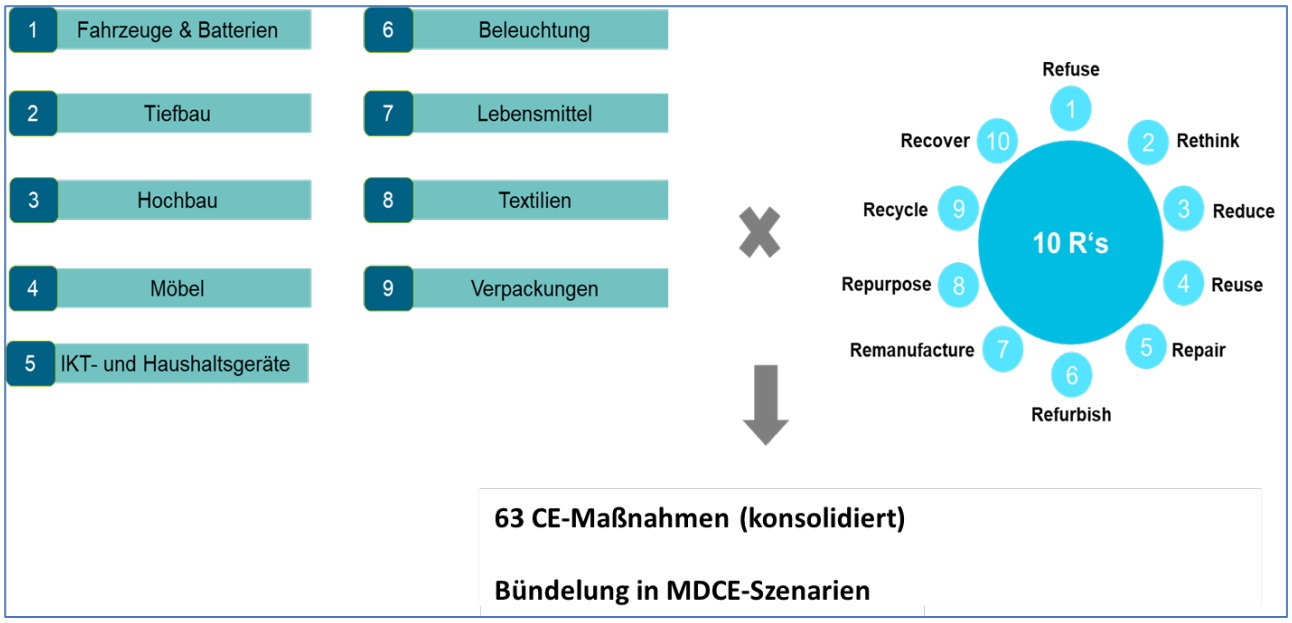
3.2 Auswahl von Sektoren und Maßnahmen für die Modellierung der Circular Economy

Die Auswahl von Sektoren und CE-Maßnahmen erfolgte im Rahmen der MDCE-Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022). Die MDCE-Machbarkeitsstudie identifizierte insgesamt elf Sektoren, die allerdings in der vorliegenden Studie zum Zweck der Ergebnisdarstellung in neun Sektoren konsolidiert. Dabei wurden Fahrzeuge und Batterien sowie IKT und Haushaltsgeräte, v.a. aufgrund der Wechselwirkungen und großen Schnittmengen, in zwei Sektoren zusammengefasst.

Die Auswahl von CE-Maßnahmen erfolgte ebenfalls in der MDCE-Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022). Dabei wurden die fünfstufige Abfallhierarchie sowie die 10-R-Strategien berücksichtigt. Die Studie enthält somit auch eine Reihe von Vermeidungsmaßnahmen, womit ein ganzheitlicher Blick auf Circular Economy ermöglicht wird. Die Vermeidungsmaßnahmen sind wesentliche Treiber für die Erreichung des Ziels „Ressourcenflüsse verlangsamen“ – eine zentrale Handlungsstrategie auf dem Weg zu einer Circular Economy. Daher wurde besonders auf die obersten Stufen zur Abfallvermeidung (Vermeidung, Wiederverwendung, Reparaturen, Substitution) fokussiert.

Die in der MDCE-Machbarkeitsstudie identifizierten 107 CE-Maßnahmen wurden im Rahmen der Modellierung in 63 CE-Maßnahmen konsolidiert und in den vier MDCE-Szenarien gebündelt.

Tabelle 3-2: CE-Maßnahmen für die Modellierung in den ausgewählten Sektoren



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Definition der einzelnen R-Strategien können im Anhang 7.1 gesehen werden. Eine Zusammenstellung aller CE-Maßnahmen befindet sich ebenfalls im Anhang 7.2 in den jeweiligen Sektorabschnitten.

3.3 Ökologische und ökonomische Kenngrößen für die Modellierung

3.3.1 Ökologische Kenngrößen

Betrachtet wurden drei Kategorien von Umwelteffekten im Bereich der Circular Economy: (1) die Treibhausgasemissionen zur Abschätzung von potenziellen Beiträgen der Circular Economy im Kampf gegen den Klimawandel, (2) die Ressourcennutzung als ursprünglicher Fokus des Konzeptes der Zirkularität von Material und (3) die Landnutzungsänderung, die auch als Proxy für den Einfluss auf die Biodiversität dienen kann.

Treibhausgasemissionen (nach UBA 2023): Treibhausgase (THG) 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_2O), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O), 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_2O, NO_x, SO_x, SF_6, HFCs, PFCs. Die jeweils emittierten Mengen werden mithilfe von Umrechnungsfaktoren aus dem 5. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in CO_2-Äquivalente (CO_2-Äq) umgerechnet. Die gewichteten Faktoren (Charakterisierungsfaktoren) der berücksichtigten Treibhausgase sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Als daraus folgenden Indikator geben wir das Treibhauspotenzial (Global Warming Potenzial) als GWP_{100} an.

Tabelle 3-3: Betrachtete Treibhausgase und entsprechende GWP_{100}-Faktoren[9]

Treibhausgas (THG)	Treibhauspotenzial (global warming potential, GWP_{100})
CO_2	1
CH_4	27,9
N_2O	273
SF_6	25.200
HFCs	10.740
PFCs	8.748

Quelle: Eigene Darstellung nach Masson-Delmotte et al. (2021)

Ressourcennutzung: Ziel war es, den Einfluss der Circular Economy auf die Inanspruchnahme von Ressourcen abzubilden und dabei an die entsprechenden Diskussionen im politischen und wissenschaftlichen Kontext anschlussfähig zu sein[10]. Ausgewählt wurden:

[9] Charakterisierungsfaktoren für HFCs und PFCs wurden basierend auf EPA (2022) berechnet. Für den Sektor Lebensmittel wurde die Modellierung auf Basis einer Bottom-Up LCA-Analyse erstellt, bei der die klimarelevanten Emissionen ebenfalls auf Basis der Emissionsfaktoren des IPCC AR6 abgeschätzt werden.

[10] Für den Sektor Lebensmittel wurde für die Modellierung der Ressourcennutzung ein zweigleisiges Verfahren gewählt. Bei der Beschreibung der Ressourcennutzungseffekte auf Sektorebene (vgl. Abschnitt 4.1.2.4) erfolgt die Diskussion der Ergebnisse der Bottom-Up LCA-Analyse auf Basis der Auswertung der LCIA-Indikatoren Ressourcennutzung (fossil) und Ressourcennutzung (Metalle und Mineralien). Aufgrund

Rohstoffkonsum (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. Damit gibt der RMC den Ressourcenbedarf des inländischen Konsums und der inländischen Investitionen an. Der RMC findet Verwendung in der nationalen Ressourceneffizienzstrategie bzw. der Nachhaltigkeitsstrategie. Um den Detailgrad zu erhöhen, wird zwischen Biomasse und mineralischen, metallischen sowie fossilen Rohstoffen unterschieden und aus EXIOBASE die Indikatoren $RMC_{biotisch}$ und $RMC_{abiotisch}$ berechnet.

Gesamter Materialaufwand (Total Material Consumption) TMC: Im Gegensatz zum RMC betrachtet der TMC Materialflüsse aus verwerteter, aber auch unverwerteter Entnahme und liegt somit immer über dem RMC. Ebenso wie der RMC umfasst er dabei den Ressourcenbedarf für die inländische Verwendung aus Konsum und Investitionen nicht aber für den Export von Waren benötigte Ressourcen. Auch für den TMC unterscheiden wir aus EXIOBASE heraus zwischen $TMC_{biotisch}$ und $TMC_{abiotisch}$. Da es aus Umweltperspektive keinen Unterschied macht, ob Ressourcen zur Weiterverarbeitung oder als Abraum entnommen werden, findet der TMC als gesamter Materialaufwand in wissenschaftlichen Diskussionen neben dem Rohstoffkonsum RMC Verwendung. 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.

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. Der Indikator der Landnutzung soll auch als Proxy für die Abschätzung von Effekten der Circular Economy auf die biologische Vielfalt ermöglichen. Um die unterschiedliche Wertigkeit für die Biodiversität verschiedener Flächenarten widerspiegeln zu können, werden aus EXIOBASE neben dem Gesamtflächenverbrauch auch der Bedarf an Weidefläche, Ackerland und Wald herangezogen. Weitere Flächennutzungsarten (bspw. Siedlungs- und Verkehrsfläche) wurden jedoch unter sonstige Landnutzung zusammengefasst.

Die Analyse der Umweltwirkungen für alle drei Dimensionen folgt dem Konzept des Fußabdrucks des deutschen Konsums. Die ökologischen Kenngrößen werden nicht auf Wirkungen innerhalb Deutschlands begrenzt, sondern global ohne Lokalisierung angegeben. Um eine Verknüpfung der Ergebnisse mit der Debatte um die deutschen Klimaschutzziele zu erlauben, erfolgt in der Dimension Treibhausgasemissionen eine Satellitenanalyse zum potenziellen Beitrag der Circular Economy zur Dekarbonisierung der deutschen Industrie (siehe Exkurs Satellitenanalyse Industrietransformation). Hierbei muss ein Transfer der Annahmen von der Ebene des deutschen Konsums auf die Ebene der Produktion von Gütern in Deutschland geschehen. Der Betrachtungsrahmen ändert sich, wodurch die Ergebnisse nicht additiv zu sehen sind.

der höheren Granularität der Auflösung des Bottom-Up-LCA Modells erscheint eine Diskussion der Maßnahmenwirkung auf Basis der genannten LCA-Indikatoren hier begründbar. Anders als z.B. im Falle der THG-Emissionen ist eine Addition zu den Ressourcennutzungsergebnissen der übrigen Sektoren aus der MRIO hier jedoch nicht möglich. Bei der Darstellung des Beitrags des Sektors zu den Gesamtergebnissen, wurden aus Kohärenzgründen die Ergebnisse der MRIO-Modellierung herangezogen.

Exkurs: Ansatz Biodiversitätsbewertung

Wie bereits im Abschnitt oben dargestellt, wird der ökologische Indikator Landnutzung als Hilfsindikator genutzt, um über alle betrachteten Sektoren hinweg zumindest grob orientierend den Einfluss der vorgeschlagenen CE-Maßnahmen auf Biodiversität aufzeigen zu können. Die vorliegende Studie leistet jedoch keine umfassende Bewertung des Einflusses der Circular Economy auf die Biodiversität. Für eine entsprechende Bewertung fehlt es – nach wie vor – an einer über die betrachteten Wirtschaftssektoren hinweg vergleichbar gut geeignete und zugleich praxistaugliche Bewertungsmethode. Auch die teilweise nicht ausreichende Datenbasis setzt der Bewertung biodiversitätsrelevanter Aspekte der Circular Economy in dieser Studie aktuell noch Grenzen.

Dennoch wurde im Rahmen des Vorhabens untersucht, welche aktuellen Bewertungsansätze bereits genutzt werden können (vgl. Sektor Lebensmittel und Ernährung, Textilien) und welche Ansätze ggf. für zukünftige Arbeiten interessant sein könnten. Die bei der Modellierung in einzelnen Sektoren berücksichtigten Ansätze werden in Abschnitt 3.5.4 beschrieben.

3.3.2 Sozioökonomische Kenngrößen

Um eine multidimensionale Analyse der Circular Economy und ihrer Maßnahmen zu erlauben, wurden neben den Umweltindikatoren auch sozioökonomische Wirkungskategorien herangezogen. Die Wirkung von CE-Maßnahmen innerhalb des deutschen Konsums auf sozioökonomischen Indikatoren wird auf Deutschland begrenzt. Dies stellt einen Gegensatz zu den ökologischen Indikatoren dar, die global betrachtet werden. Als sozioökonomische Indikatoren wurden ausgewählt:

Bruttowertschöpfung: Die Bruttowertschöpfung ist ein Indikator, der den Mehrwert der im Produktionsprozess erzeugten Waren und Dienstleistungen einer Volkswirtschaft abbildet, also den Produktionswert abzüglich der Vorleistungen. Die über alle Wirtschaftsbereiche aggregierte Bruttowertschöpfung zuzüglich Gütersteuern und abzüglich Gütersubventionen entspricht dem Bruttoinlandsprodukt. Da in der vorliegenden Studie jedoch nur die Wertschöpfung, die mit den neun betrachteten Sektoren zusammenhängt, und nicht die gesamte Volkswirtschaft betrachtet wird, eignet sich das Bruttoinlandsprodukt nicht als Indikator. Die Bruttowertschöpfung kann hingegen auch für einzelne Wirtschaftsbereiche angegeben werden. Sie setzt sie sich in erster Linie zusammen aus Löhnen sowie Gewinnen und Abschreibungen. Im Zuge der CE-Maßnahmen ist von Veränderungen in der Wertschöpfung einiger Sektoren auszugehen. Beispielsweise kann es zu einer Reduktion der Wertschöpfung im Bereich der Primärrohstoffgewinnung kommen, wenn weniger Primärrohstoffe nachgefragt werden, während Reparaturdienstleistungen ggf. ihre Wertschöpfung steigern können.

Arbeitskräftebedarf: Der Indikator gibt an, wie viele Menschen (im Sinne von Vollzeitäquivalenten) direkt in den jeweiligen Branchen beschäftigt sind. Ähnlich zur Wertschöpfung können die CE-Maßnahmen zu Veränderungen im Arbeitskräftebedarf, sowohl in einzelnen Wirtschaftsbereichen als auch gesamtwirtschaftlich, führen. Die Wirkung auf den Arbeitskräftebedarf wurde für die untersuchten Wirtschaftsbereiche zudem nach Qualifikationsniveau und Geschlecht differenziert und analysiert.

An dieser Stelle soll nochmal hervorgehoben werden, dass die Studie Effekte, die außerhalb der in der Studie betrachteten Sektoren auftreten können, aufgrund der Komplexität der Wechselwirkungen und unvorhersehbarer Entwicklungen nur teilweise berücksichtigt. Beispiele sind Preiseffekte, Innovationseffekte, Wirkung auf den Außenhandel, zukünftige Investitionen und Multiplikatorwirkungen. **Die Ergebnisse sollten daher nicht als gesamtwirtschaftliche Folgenabschätzung einer Circular Economy für Deutschland interpretiert werden**. Auf der anderen Seite deckt die Studie,

im Gegensatz zu vielen Modellierungsstudien, CE-Maßnahmen in allen 10-R-Strategien ab und zeigt damit ein insgesamt differenziertes Bild im Hinblick auf die sozioökonomischen Effekte. Mit dem breiten Verständnis der Circular Economy werden sowohl positive als auch negative Effekte auf die sozioökonomischen Indikatoren in verschiedenen Wirtschaftsbereichen sichtbarer.

3.3.3 Kritikalität & Rohstoffversorgungssicherheit

Für die Kritikalitätsbewertung in der MDCE-Modellierung werden durch die Auswahl der betrachteten Rohstoffe (Kapitel 3.5.6) volkswirtschaftliche und ökologische Kritikalität verschränkt: Die Sicherheit der Versorgung Deutschlands mit benötigten Rohstoffen wird in der Kritikalitätsbewertung in der Regel aus den zwei Dimensionen *wirtschaftliche Bedeutung* und *Wahrscheinlichkeit von Versorgungsengpässen* für jeden Rohstoff individuell ermittelt. Bei der Auswahl der zu betrachtenden Rohstoffe wurde eine dritte Dimension der Kritikalität, nämlich das *Umweltgefährdungspotenzial* („ökologische Kritikalität“) gemäß dem Projekt ÖkoRess des Umweltbundesamts (Dehoust et al. 2020), berücksichtigt. Dies umfasst technische, geologische und Standortfaktoren der Gewinnungsregionen, Einschätzungen zur Umwelt-Governance der Förderländer und das weltweite Maß an Material- und Energieströmen, die mit der Förderung und Aufbereitung der Rohstoffe verbunden sind.

Viele Faktoren dieser Risikoermittlung, wie die politische Stabilität von rohstoffproduzierenden Ländern, Verbesserung oder Verschlechterung der Umweltauflagen für die Gewinnung, die Öffnung und Schließung von Minen oder Rohstoffpreise lassen sich im Rahmen einer solchen Studie nicht in die Zukunft projizieren. Die Auswirkungen der CE-Maßnahmen auf die Versorgungssicherheit, bspw. durch Reduktion oder Verschiebung des Rohstoffbedarfs oder Erhöhung des heimischen Angebots durch Recycling, können jedoch abgeschätzt werden. Sie werden relativ zur Lage heute bzw. zum Baseline-Szenario als voraussichtliche Verbesserung oder Verschlechterung angegeben.

3.4 Wirkmodelle

Um die sehr vielfältigen Maßnahmen der Circular Economy in den ebenso sehr unterschiedlichen neun Sektoren systematisch abbilden und für eine spätere Modellierung von Effekten handhabbar zu machen, wurde mit Wirkmodellen gearbeitet. Für jede Maßnahme wurde durch die jeweiligen Sektorexpert*innen nach den folgenden Arbeitsschritten ein Wirkmodell erstellt:

1. Genaue Definition und Abgrenzung der Maßnahme
2. Benennung der direkten Effekte der Maßnahme
3. Identifikation (wichtiger) indirekter Effekte
4. Recherche der Datenlage
5. Quantifizierung der Wirkzusammenhänge soweit möglich

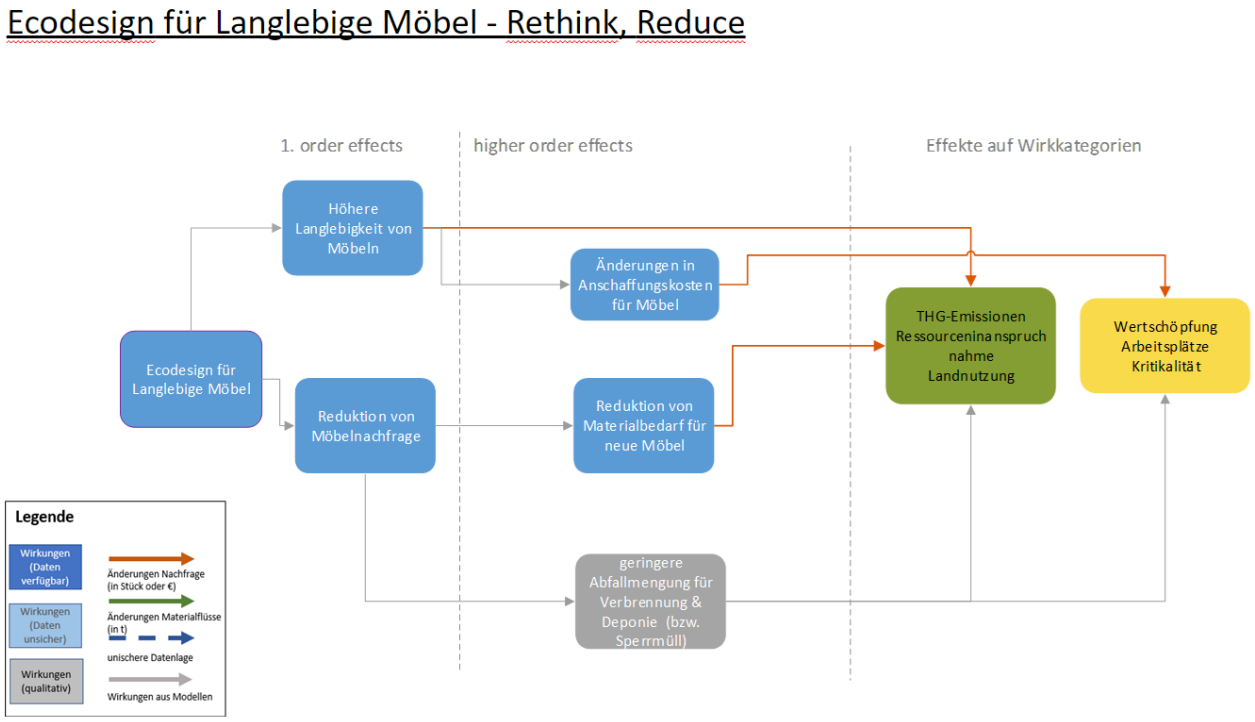
Die Herausarbeitung der Betrachtungsgrenzen ist wichtig für die spätere passgenaue Übersetzung der Maßnahme in den großen Modellierungskontext. Welche Produktgruppen oder Materialflüsse sind betroffen, welche sind im Rahmen dieser Studie ausgeschlossen? Die Effekte der Maßnahme bilden die Änderungsimpulse auf den wirtschaftlichen Kontext ab. Als solche fließen sie in die Modellierung ein und verursachen die Änderungen in den anvisierten ökologischen und sozioökonomischen Wirkungskategorien. In Anbetracht der Bandbreite an betrachteten Wirkungskategorien ist eine davon losgelöste, neutrale und systematische Erfassung der direkten und indirekten Effekte der Maßnahmen wichtig. Ebenso sollte hierbei zunächst losgelöst von der Datenverfügbarkeit und der Abbildbarkeit in dem Modellsystem gearbeitet werden, um ein umfassendes Verständnis der Wirk-

zusammenhänge jeder Maßnahme zu entwickeln. Erst in den nächsten Schritten wurden durch Literatur- und Datenbankrecherche die Datenlage erarbeitet und die Wirkzusammenhänge dann auch quantifiziert.

Dieses Vorgehen lieferte einen umfangreichen Katalog von systematisch erarbeiteten Wirkmodellen zu einer weiten Bandbreite an CE-Maßnahmen in neun Sektoren. Er liefert eine wertvolle Basis für zukünftige Arbeiten, ermöglicht das tiefere Einsteigen in einzelne Maßnahmen bspw. Ausprägungsvarianten und zeigt Wissens- und Datenlücken auf. Innerhalb dieser Studie sind die Wirkmodelle ein Zwischenergebnis und können nur in begrenztem Ausmaß diskutiert und präsentiert werden (vgl. Sektorspezifische Modellierungsparameter im Anhang). Aus methodisch-wissenschaftlicher Sicht sind sie eine wertvolle, systematische Wissenssammlung.

Die quantifizierten Wirkmodelle jeder Einzelmaßnahme wurden von den Sektorexpert*innen an die Modellierung übergeben, wo die identifizierten und quantifizierbaren Effekte als Änderungsimpulse Eingang fanden.

Abbildung 3-4: Beispiel eines Wirkmodells für die Maßnahme „Ecodesign“ im Sektor Möbel



Quelle: Eigene Darstellung

3.5 Modellierung

3.5.1 Einführung

In den folgenden Abschnitten werden das Modellsystem und die einzelnen zur Folgenabschätzungen verwandten Modelle beschrieben. Hier zunächst einige einordnende Sätze.

Bei der Folgenabschätzung von CE-Maßnahmen wurde ein Fokus gelegt auf diejenigen Gruppen von Konsumgütern, deren Produktion und Nutzung mit hohen Umweltbelastungen verbunden sind

und sie entsprechend hohe Potenziale für Nutzen aus CE-Maßnahmen bieten.[11]. Es wurde dabei insbesondere die inländische Nachfrage mit einem Schwerpunkt auf den privaten Konsum einbezogen, wohingegen Potenziale der Circular Economy in der Produktion von Gütern für den Export nicht mitberücksichtigt sind.

Es werden sowohl Umweltwirkungen als auch sozioökonomische Effekte quantifiziert, um mögliche Zielkonflikte aufzuzeigen. Die Modellierung bildet ab, wie sich eine Änderung der inländischen Nachfrage der betrachteten Güter auf die Produktion der an der Wertschöpfungskette beteiligten Wirtschaftsbereiche im In- und Ausland auswirkt. An die Produktion dieser Wirtschaftsbereiche sind spezifische sozioökonomische und Umweltindikatoren gekoppelt. Im Gegensatz zu den ökologischen Indikatoren werden die sozioökonomischen Indikatoren nicht global ausgewiesen, sondern nur für Deutschland.

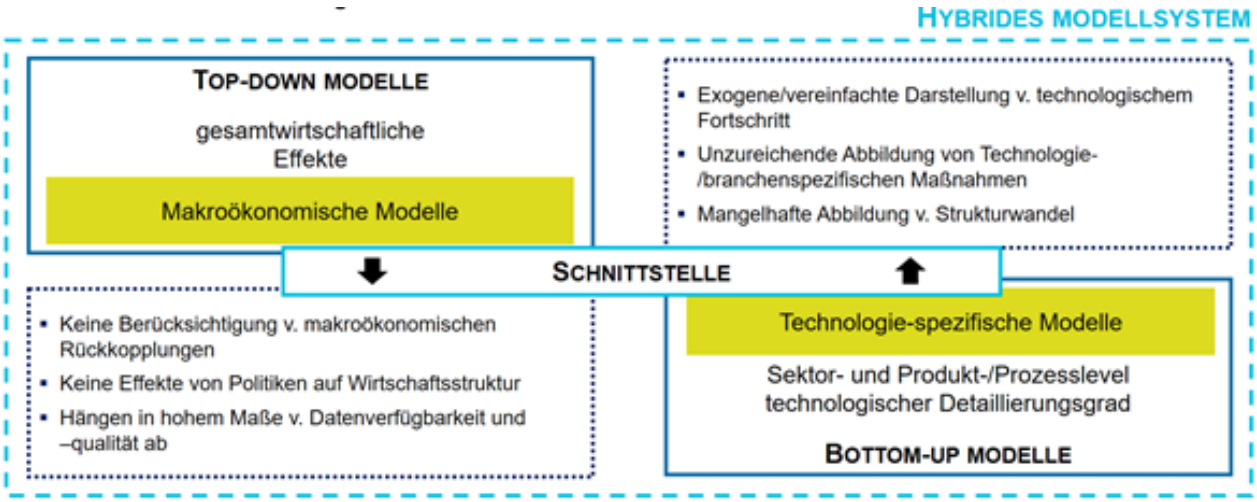
Die Ergebnisse der Modellierung sollten nicht als gesamtwirtschaftliche Folgenabschätzung einer CE-Strategie für Deutschland interpretiert werden. Die mit der inländischen Nachfrage nach diesen Gütern verbundene Wertschöpfung und der damit einhergehende Arbeitskräftebedarf in Deutschland entspricht etwa 15 Prozent der gesamten Wertschöpfung und 20 Prozent des gesamten Arbeitskräftebedarfs. Dies liegt unter anderem daran, dass ein großer Teil der deutschen Wertschöpfung und des Arbeitskräftebedarfs auf die Produktion von Gütern für den Export zurückgeht. Zwar nähert sich die Analyse durch die zusätzliche Berechnung des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen einer gesamtwirtschaftlichen Analyse an (siehe 3.5.5), dennoch umfasst das verwandte Modell nicht die Komplexität eines dynamischen und geschlossenen gesamtwirtschaftlichen Modells. Viele Aspekte wie Preiseffekte, Innovationseffekte, Wirkung auf den Außenhandel, zukünftige Investitionen etc. sind außerhalb des Scopes dieser Studie. Die Stärke des gewählten Modellierungsansatzes liegt in der Kombination von Bottom-up Wirkmodellen mit einem in Bezug auf Wirtschaftsbereiche und Regionen hoch aufgelösten um eine Vielzahl an ökologischen und sozioökonomischen Indikatoren erweitertes Input-Output-Modell.

3.5.2 Allgemeiner Ansatz und Beschreibung des Modellsystems

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 jede Modellierer*in eine mehr oder minder herausfordernde Aufgabe dar. So ist die Auswahl an Modelltypen (siehe Abbildung 3-5; 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).

[11] Siehe MDCE-Machbarkeitsstudie Prakash et al. (2022)]

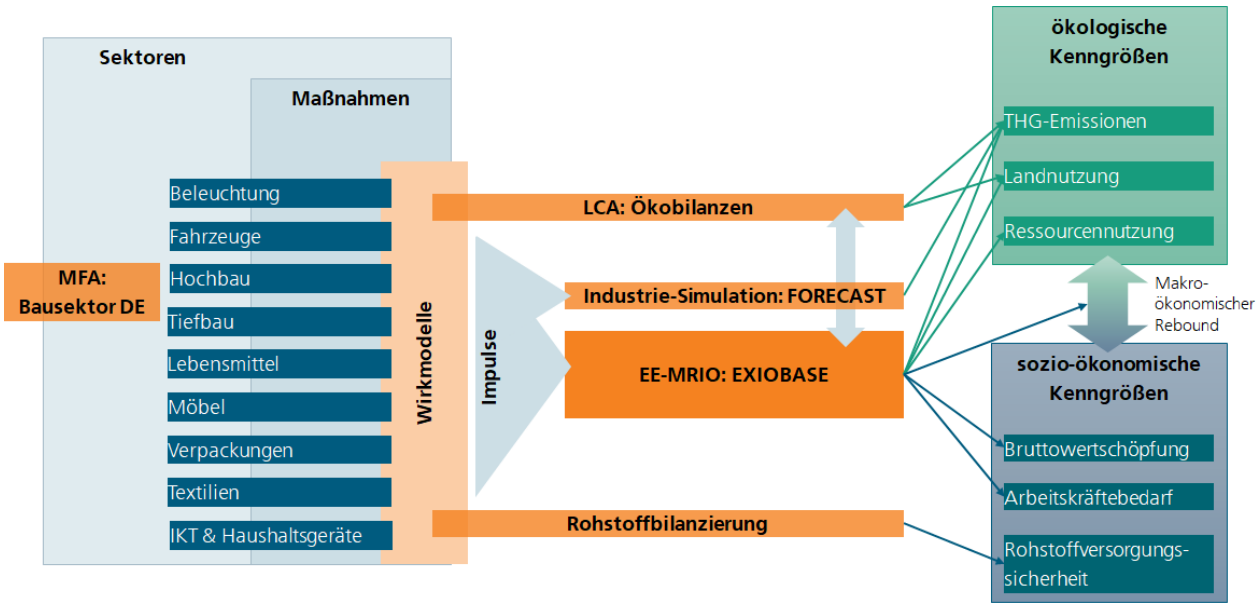
Abbildung 3-5: Hybrides Modellsystem



Quelle: Eigene Darstellung.

Das vorgeschlagene sektorübergreifende hybride Modellsystem (siehe Abbildung 3-5) 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 Modellsystems ist, eine qualitative und quantitative Folgeabschätzung der in Bezug auf die inländische Nachfrage definierten CE-Maßnahmen in den Schlüsselsektoren in Deutschland zu ermöglichen.

Abbildung 3-6: Das Modell Deutschland Circular Economy



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Zentrum des Modellsystems steht ein um Umweltwirkungskategorien erweitertes multiregionales Input-Output Modell (EE-MRIO für engl. environmetally extended multi-regional input-output). 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. 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).

Die Methode erlaubt daher eine ganzheitliche Betrachtung der deutschen Endnachfrage in verschiedenen Produktgruppen mit ihren globalen Wertschöpfungsketten und der Verknüpfung mit nötigen Ressourcenentnahmen aus der Umwelt sowie folgende Emissionen in die Umwelt. Hierdurch ist das EE-MRIO-Modell in der Lage, sowohl die anvisierten ökologischen Kenngrößen der Treibhausgasemissionen, Landnutzung und Ressourcennutzung wie auch die sozioökonomischen Kenngrößen von Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf, beides bezogen auf den deutschen Konsum, abzubilden. Als Datenbasis für die volkswirtschaftlichen wie ökologischen Zusammenhänge dient die Datenbank EXIOBASE.

Exkurs: EXIOBASE

Unter den verfügbaren EE-MRIO-Datenbanken eignet sich EXIOBASE (vgl. Stadler et al. 2018) aufgrund seiner vergleichsweise hohen sektoralen Auflösung und seiner detaillierten Umwelterweiterungen besonders gut für die Analyse von ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten. Die aktuelle Version von EXIOBASE (v.3.8.2)[1] basiert auf detaillierten Wirtschafts- und Umweltdaten auf einer Aggregationsebene von 163 Wirtschaftszweigen, 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 Anhang für eine detaillierte Liste der in EXIOBASE erfassten Umweltkategorien). Neben Umwelterweiterungen umfasst EXIOBASE auch detaillierte sozioökonomische Erweiterungen, wie die Aufschlüsselung einzelner Elemente der Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf unterteilt in Qualifikationsniveaus und Geschlecht.

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 realen Datenpunkte der Umwelterweiterungen enden in folgenden Jahren: 2015 Energie, 2019 alle Treibhausgase (Nicht-Brennstoffe, Nicht-CO_2 werden ab 2018 prognostiziert), 2013 Rohstoffe, 2011 die meisten anderen, einschließlich Landnutzung und Wasser. Auf dieser Grundlage wurde beschlossen, die Datenreihe 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. Konkret wurde die industriespezifische Version gewählt, da hier (im Gegenteil zur produktbasierten Version) Sekundärrohstoffe abgebildet sind.

Für die Abbildung der CE-Maßnahmen in dem EE-MRIO Modell werden die in den Wirkmodellen für jede Maßnahme quantitativ erfassten und systemisch analysierten Wirkzusammenhänge als Daten-

basis verwendet und in wirtschaftliche Impulse übersetzt (siehe 3.4), die auf die Input-Output-Tabellen angewendet werden können. Konkret ergeben sich durch die Maßnahmen direkte Änderungen in der Nachfragehöhe und Struktur. Diese Impulse bewirken Verschiebung innerhalb der Wertschöpfungsketten. Mit Hilfe von Input-Output-Rechnung können die direkten und indirekten Änderungen in der Produktion, differenziert nach Wirtschaftszweigen und Ländern erfasst werden. Aufbauend darauf wird die Wirkung auf ökologische und ökonomische Kenngrößen quantifiziert. Als gesamtwirtschaftliches Modell sind in den Input-Output Tabellen grundsätzliche alle Wirtschaftszweige und somit alle betrachteten Sektoren repräsentiert. Die Anzahl der unterschiedenen Wirtschaftszweige bzw. Produktgruppen ist jedoch endlich, weswegen die Zuordnung je nach adressiertem Sektor und dafür definierten Maßnahmen auf betroffene Produkte unterschiedlich schwierig ist. Um die Passgenauigkeit der Übersetzung zu prüfen und eine Qualitätssicherung der Ergebnisse aus einer Bottom-up-Modellierungsperspektive zu ergänzen, wurden zusätzlich zu EE-MRIO Methodik Ökobilanzen aus der Literatur herangezogen.

Exkurs: Einordnende LCA-Analysen

Als typische Bottom-up-Methode verfolgt die Ökobilanzierung (LCA) 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/ oder Wertschöpfungsketten. Sie erlaubt insbesondere, die Potenziale, die mit einer effektiven Umsetzung von R-Strategien einhergehen, mit einem breiten Set an Umweltindikatoren, abzubilden und ist insbesondere geeignet die potenziellen Umweltauswirkungen von Produkt- oder Prozessalternativen zu vergleichen. Was mit einer (attributiven) Ökobilanz jedoch nicht oder ggf. nicht immer ausreichend abgebildet wird, sind die bestehenden Wechselwirkungen und teilweise komplexen und hochdynamischen Verflechtungen von Produkten, Lieferketten und Branchen. Die Ökobilanz dient in der vorliegenden Studie in einigen Sektoren als wertvoller Referenzpunkt zum Abgleich der MRIO-Ergebnisse in den ökologischen Kenngrößen. Wo verfügbar wurden LCA-Ergebnisse mit ihrem hohen Detailgrad zum Vergleich der umfassenden, aber gröber aufgelösten Top-down-Ergebnisse der MRIO herangezogen. Wo möglich und sinnvoll dient der gegenüberstellende Vergleich der Top-down MRIO-Ergebnisse mit den Bottom-up LCA-Ergebnissen als zusätzliche Absicherung der Ergebnisse.

Dies war insbesondere wichtig für die zwei als „Hotspots“ identifizierten Sektoren IKT & Haushaltsgeräte sowie Lebensmittel und Ernährung. Für den IKT & Haushaltsgerätesektor bestand das Problem in der Vielzahl an kleinteiligen und diversen Produkten. Die für diese Produkte definierten CE-Maßnahmen waren schwierig als Impulse in die begrenzte Anzahl von Produktkategorien der MRIO-Tabellen übersetzbar. Daher wurden entsprechende Ökobilanzen herangezogen und auf den gesamtwirtschaftlichen Rahmen hochskaliert. Das Ergebnis war eine sehr hohe Passgenauigkeit der ökologischen Kenngrößen aus Ökobilanz und MRIO. Den definierten Impulsen und den daraus folgenden Ergebnissen der MRIO wurde daher eine gute Qualität zugesprochen.

Der zweite identifizierte Hotspot ist der Sektor Lebensmittel und Ernährung, dem sowohl in Bezug auf die Treibhausgasemissionen, Ressourcennutzung und insbesondere in der Bewertungsdimension der Landnutzung (inkl. Effekte auf Biodiversität) eine hohe Bedeutung zukommt. Wie die Auswertung der Ergebnisse aus den LCA-Analysen zeigte, liegen die auf Basis der bottom-up abgeschätzten potenziellen Umwelteffekte wesentlich über den einschlägigen Ergebnissen der MRIO. Hier ist anzumerken, dass die LCA-Analyse eine deutlich detailliertere Auflösung der verschiedenen Lebensmittelgruppen in den jeweiligen Warenkörben zulässt als dies in den vorgegebenen Kategorien der EXIOBASE-Datenbank der Fall ist. Dies führt dazu, dass Effekte des Dietary Shift, die sich entweder innerhalb derselben EXIOBASE-Warenkategorie ergeben, oder aber innerhalb sehr breiten in Hinblick auf Umweltbelastungen heterogene Warengruppen in der für die vorliegende Studie genutzten MRIO-Datentabelle nicht abgebildet werden können. Die Ergebnisse der Bottom-up-LCA

Analyse sind in dieser Hinsicht in ihrem Zustandekommen transparent und nachvollziehbar. Auch ein anhand der Status quo-Ernährungsstile durchgeführter Quervergleich zeigt, dass die vorliegenden LCA-Ergebnisse als belastbar eingeschätzt werden können. Letztlich wurde daher entschieden, für den Sektor Lebensmittel für die Modellierung der Ressourcennutzung ein zweigleisiges Verfahren umzusetzen. Bei der Beschreibung der Ressourcennutzungseffekte auf Sektorebene (vgl. Abschnitt 4.1.2.4) erfolgt die Diskussion der Ergebnisse der Bottom-up-LCA-Analyse auf Basis der Auswertung der LCIA-Indikatoren Ressourcennutzung (fossil) und Ressourcennutzung (Metalle und Mineralien). Aufgrund der höheren Granularität der Auflösung des Bottom-up-LCA Modells erscheint eine Diskussion der Maßnahmenwirkung auf Basis der genannten LCA-Indikatoren hier begründbar. Anders als z.B. im Falle der THG-Emissionen ist eine Addition zu den Ressourcennutzungsergebnissen der übrigen Sektoren aus der MRIO hier jedoch nicht möglich. Bei der Darstellung des Beitrags des Sektors zu den Gesamtergebnissen, wurden aus Kohärenzgründen die Ergebnisse der MRIO-Modellierung herangezogen.

Auf Seiten der ökologischen Kenngrößen wurde außerdem das Industrie-Simulationsmodell FORECAST zur erweiterten Betrachtung der Dimension THG-Emissionen und Energieverbrauch herangezogen. Der Betrachtungsfokus dieser Studie liegt auf den Effekten von Circular Economy auf den deutschen Konsum und seine verknüpften ökologischen und sozioökonomischen Kenngrößen. Die ökologischen Kenngrößen bilden daher nach dem Konzept des Fußabdrucks die durch die gesamte Wertschöpfungskette und damit global verursachten Umweltwirkungen ab. Somit sind die Ergebnisse in der Dimension THG-Emissionen nicht anschlussfähig mit der Diskussion um die deutschen Klimaschutzziele, wo es um innerhalb Deutschlands emittierte Treibhausgase geht.

Innerhalb einer Satellitenanalyse übersetzen wir die Erkenntnisse aus den Wirkmodellen der CE-Maßnahmen daher außerdem in Impulse auf die Produktion energieintensiver Grundstoffe (z.B. Stahl, Zement, Aluminium, etc.) in Deutschland. Diese energieintensiven Grundstoffe werden im Bottom-up-Simulationsmodell FORECAST Industrie abgebildet, welches Endenergieverbrauch und direkte Emissionen des Industriesektors für Deutschland berechnet. Aus den Ergebnissen können dann Schlussfolgerungen für die Beiträge einer implementierten Circular Economy zur Dekarbonisierung des deutschen Industriesektors gezogen werden.

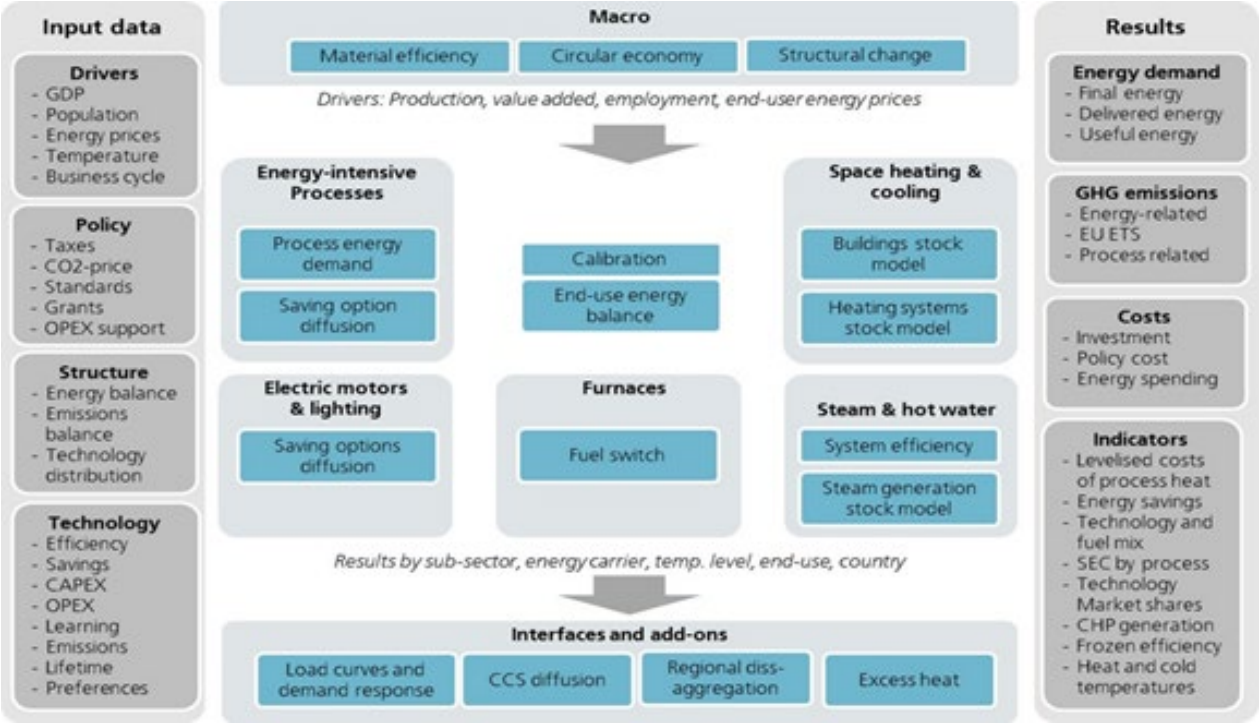
Exkurs: Industrie-Simulationsmodell FORECAST

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 CO_2-Preise, Annahmen zu Instrumenten, Strukturdaten wie Energie- und Treibhausgasbilanzen sowie techno-ökonomische Daten der abgebildeten Technologien (siehe Abbildung 3-7) 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.
- **Elektromotorsysteme und Beleuchtung** finden Anwendung in sämtlichen Branchen und verschiedenen Prozessen (z.B. Elektromotoren).

- Der **Raumwärmebedarf** wird über Flächenkennwerte je Subsektor berechnet.
- Der Wärmebedarf in **Industrieöfen** findet vorwiegend im Temperaturniveau über 500 °C statt und beruht auf den Berechnungen des Prozessmoduls.
- **Warmwasser- und Dampferzeugung** und -verteilung werden in einer Vielzahl von Prozessen, vor allem in der chemischen Industrie, dem Papier- und der Nahrungsmittelindustrie benötigt.

Abbildung 3-7: Übersicht Modell FORECAST Industry



Quelle: Fraunhofer ISI.

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 CO_2-Preisen.
- **Prozesswechsel auf CO_2-arme bzw. CO_2-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.

- **CO_2-Abscheidung und Speicherung (CCS):** 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 CO_2-Vermeidungshebel
- Berücksichtigung der Auswirkungen von der CE-Maßnahmen durch Veränderung der nachgefragten Produktionsmengen, Anteile sekundärer Produktionsprozesse, etc.

Analyse der Auswirkungen von CE auf industrielle Endenergienachfrage und CO_2-Emissionen in Deutschland.

Als einzige der anvisierten sechs Kenngrößen können die Effekte der Circular Economy auf die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen nicht durch ein bestehendes Modellsystem abgedeckt werden. Für diese Bewertung bedarf es Daten über die momentane deutsche Nachfrage nach individuellen Rohstoffen sowie den momentan für jeden Rohstoff bestehenden Versorgungsrisiken. Aus den Wirkmodellen kann für jede Maßnahme geschlossen werden, inwieweit sich der Importbedarf für jeden Rohstoff nach Deutschland durch die Umsetzung der Maßnahme ändert. Innerhalb einer Rohstoff-fokussierten Bilanzierung kann aus der Kombination von momentaner Lage und Änderung des Importbedarfs eine relative Verbesserung oder Verschlechterung der Versorgungssicherheit berechnet werden. Außerhalb des Betrachtungsrahmens sind dabei politische, wirtschaftliche und soziale Einflussfaktoren auf die Versorgungssicherheit. Hier steht allein der Einfluss der Circular Economy auf die Rohstoffbedarfe und -angebote im Fokus.

Als letztes erwähnt sei hier ein Materialflussmodell (MFA, engl. für material flow analysis) zum Gebäudebestand Deutschlands. Dieses wurde herangezogen für die quantitative Abbildung der Maßnahmen im Hoch- und Tiefbau innerhalb der Wirkmodelle. Es lieferte eine breite und qualitativ hochwertige Datenbasis für diese zwei Sektoren, ist jedoch selbst nicht Teil des Modellsystems zur Bewertung der Effekte der Circular Economy auf die ökologischen und sozioökonomischen Kenngrößen.

3.5.3 Implementierung des Modellsystems

Die Dateninputs für die EE-MRIO-Modellierung wurden durch Einzelgespräche zwischen den Sektorexpert*innen und den MRIO-Modellierer*innen abgestimmt. Dabei erhielten die Sektorexpert*innen einen Überblick über die Modellierung und die Datenanforderungen von EE-MRIO, um gezieltes Feedback zu ermöglichen. Die Treffen boten eine Plattform für einen umfassenden Austausch über die Schnittstelle zwischen den Wirkmodellen und der EE-MRIO-Modellierung und ermöglichten eine optimierte Datenintegration und Spezifikation in der Modellierung. Die Gespräche verdeutlichen Abweichungen zwischen den Datenanforderungen der EE-MRIO-Modellierung und der Datenausgabe aus den Wirkmodellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass EXIOBASE auf monetären Werten basiert, während die Expert*innen aus den Sektoren teils physische Mengeneinheiten in der Berechnung verwendeten. In diesen Fällen war eine Umrechnung in monetäre Werte für die Aufbereitung der Daten erforderlich. Dazu wurden prioritär Produktionswerte verwendet und die verbleibenden

Datenlücken mit auf das Basisjahr 2015 deflationierten Preisen von Rohstoffbörsen, Außenhandels- oder Einzelhandelsdaten gefüllt. Aufgrund fehlender konsistenter Preisdaten für die auf Rezyklaten basierende Produktion wurde in Anlehnung an Wiebe et al. (2019) von einer Kostenparität zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen ausgegangen.

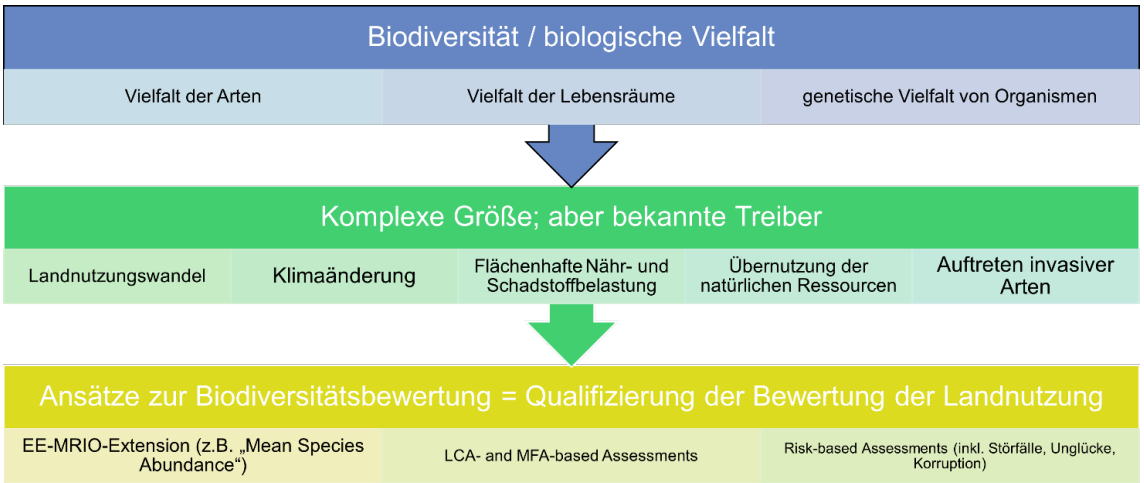
Die Veränderungen in der Nachfrage nach den jeweiligen Gütern und Dienstleistungen sowie die strukturellen Anpassungen der Produktion durch die CE-Maßnahmen wurden den 163 Wirtschaftszweigen in EXIOBASE zugeordnet. Einzelne CE-Maßnahmen führen dabei zu unterschiedlichen Nachfrageeffekten, wie ein Beispiel aus dem Verkehrssektor verdeutlichen kann: Die Maßnahme zur vermehrten Nutzung des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPV) führt zu einer Reduktion der PKW-Nachfrage und zu geringeren laufenden Ausgaben im PKW-Verkehr für Strom, Kraftstoff, Reparaturen und Versicherungen. Darüber hinaus wird ein Ausbau von ÖPV-Infrastruktur und die zusätzliche Nachfrage nach ÖPV-Dienstleistungen modelliert. Die Impulse reflektieren dabei strukturelle Entwicklungstrends für das Jahr 2045. Für die Reduktion von Neufahrzeugen wird ein Anteil von 100 % elektrisch betriebenen Autos (EVs) modelliert, aufbauend auf den aktuellen Trends in der EU-Gesetzgebung zum Verbrenner-Aus. Hierbei wurden bei der Zuordnung der Impulse auf die Wirtschaftszweige in EXIOBASE die unterschiedlichen Produktionsstrukturen von EVs im Vergleich zu Verbrennern berücksichtigt. Der Automobilbestand, der für die laufenden Ausgaben relevant ist, wurde aus der RESCUE-Studie abgeleitet und besteht in der Baseline 2045 zu 53 % aus EVs und 47 % Verbrennern. Die Veränderung der Stromnachfrage baut auf der Zusammensetzung der Stromerzeugung im Jahr 2040 des Projektionsberichts auf und wurde mit Daten des Öko-Instituts bis 2045 extrapoliert.

Diesem Beispiel entsprechend wurden Impulse für den Status quo, die Baseline für das Jahr 2045 und die drei CE-Szenarien in den neun Sektoren mit ihren jeweiligen Maßnahmen erstellt. Der Prozess der Datenaufbereitung und Modellspezifikation wurde durch iterative Feedbackschleifen (auch im Hinblick auf die Modellierungsergebnisse) durch die Sektorexpert*innen begleitet. Die Expertise der Expert*innen konnte so genutzt und die Datenintegration und Spezifikation des EE-MRIO-Modells sukzessive konsolidiert werden.

3.5.4 Ansätze zur Abschätzung von Biodiversitätseffekten der Circular Economy

Biodiversitätseffekte stehen am Ende einer Kette von Wirkungen verschiedener Parameter, die untereinander in teilweise komplexer Ursache-Wirkungs-Beziehung stehen. Bei Biodiverstitätsveränderungen handelt es sich daher i.d.R. um indirekte Effekte, die auch als sekundäre bzw. tertiäre Effekte bezeichnet werden können. Im Laufe des Vorhabens wurde für verschiedene Ansätze geprüft, inwiefern entsprechende Effekte entweder qualitativ oder ggf. auch (semi-) quantitativ abgeschätzt werden können (vgl. Abbildung 3-8).

Abbildung 3-8: Ansatz zur Bewertung biodiversitätsrelevanter Aspekte



Quelle: Eigene Darstellung.

Aus Sicht der Modellierung ist Biodiversitätsverlust ein sogenannter Wirkungsendpunkt. Im Unterschied zu vergleichsweise konkret abschätzbaren Mid Point-Indikatoren (z.B. CO_2-Äquivalente zur Abschätzung des potenziellen Beitrags zum Klimawandel), sind Wirkungsendpunkte in aller Regel ungleich schwerer und nur mit deutlich größeren Unsicherheiten quantifizier- und messbar. Ähnliches gilt für die Bewertung von Störfällen und Unvorhersehbarkeiten. Hier sind typischerweise Einzelfallbewertungen anhand von Risikoszenarien, z.B. für spezifische Produktionsstätten vonnöten, die sich jedoch nicht ohne Weiteres in generischen Modellen abbilden lassen.

Im Zuge der Arbeiten an der Modellierung wurde auch geprüft, welche der verschiedenen methodischen Ansätze zur Biodiversitätsbewertung (vgl .Abbildung 3-8) in die entwickelte Modellumgebung integriert werden können.

Mit dem Ziel einer Qualifizierung der Bewertung der im Zuge der Modellierung abgeschätzten Landnutzung wurde hierzu auch eine Adaption des auf einem MRIO-Ansatz beruhenden GLOBIO-Modell nach Wilting et al. (2017) betrachtet. Diese schätzt Biodiversitätsaspekte über den Indikator „Mean Species Abundance (MSA)“ ab. Grundlage für die Berechnung sind dabei jeweils THG-Emissionen (direkte THG-Emissionen und THG-Emissionen aus Landnutzungsänderungen). Eine Umsetzung des Ansatzes wäre aus technischer Sicht und vorbehaltlich einiger Anpassungen an die hier genutzte EXIOBASE-MRIO grundsätzlich möglich, jedoch mit vergleichsweise hohem Aufwand verbunden gewesen. Zudem ist die Methodendiskussion zur Abschätzung von Biodiversitätsaspekten ausschließlich auf Basis der MSA zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch laufend. Insbesondere der gewählte Indikator MSA wird teilweise kritisch gesehen. Vor dem Hintergrund der noch weiter anhaltenden Diskussionen wurde für das vorliegende Vorhaben entschieden, keine Bewertung von Biodiversitätsaspekten auf der Basis einer MRIO-Extension vorzunehmen. Entsprechend erfolgt die Abschätzung von Biodiversitätseffekten der Circular Economy in der vorliegenden Studie auf Basis:

- der Abbildung von Landnutzung(sänderungen) über die Bewertung in EXIOBASE; differenziert nach Wald, Weide, Infrastruktur
- einer Biodiversitätsbetrachtung im Sektor „Lebensmittel / Ernährung“ auf Basis der Abschätzung des Biodiversitätsfußabdrucks und der Biodiversitätsdifferenz nach Dräger de Teran (2021) als Ergänzung möglich, aufgrund des in diesem Sektor ohnehin erstellten Bottom-up-LCA Modells.

- Einer qualitative Bewertung von Biodiversitätsänderungen in den Sektoren Holz / Möbel und Textilien im hier vorliegenden Modellierungsbericht und auf Grundlage des Modells der SITRA-Studie (SITRA 2022).

Mit dem letztlich umgesetzten Vorgehen basierend auf der Bewertung der Landnutzung und inkl. sektorspezifischer Vertiefungsansätze kann der Einfluss der vorgeschlagenen CE-Maßnahmen auf Biodiversität und biologische Vielfalt zumindest grob orientierend aufgezeigt werden. Die vorliegende Studie leistet jedoch explizit keine umfassende Bewertung des Einflusses der Circular Economy auf die Biodiversität.

3.5.5 Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden in der ersten Modellierungsrunde die Auswirkungen der CE-Maßnahmen in den betrachteten Sektoren auf ökologische und sozioökonomische Indikatoren quantifiziert. Hierbei wurden die Wirtschaftsbereiche, die direkt oder indirekt durch die Produktion oder die Nutzung der betrachteten Güter betroffen sind, betrachtet. Sowohl vermehrte Nachfrage (z.B. nach Recycling, Reparatur, Product-as-a-Service) als auch verringerte Nachfrage (z.B. nach Primärrohstoffen) wurden miteinbezogen. CE-Maßnahmen mit Fokus auf Vermeidung (z.B. geringere Produktion von Lebensmitteln durch weniger Lebensmittelabfälle, geringere Wohn- und Büroflächen usw.) spielen insbesondere im Verhalten- und Mix-Szenario eine wichtige Rolle. In allen Szenarien führt die Gesamtheit der CE-Maßnahmen zu geringeren Ausgaben in den betrachteten Nachfragebereichen.

Unter der Annahme, dass sich die zur Verfügung stehende Produktionsfaktoren (Arbeit und Kapital) zwischen den Szenarien nicht ändern, ist das verfügbare Einkommen in den Szenarien gleich. Geringere Ausgaben in den betrachteten Nachfragebereichen führen somit im Szenarienvergleich zu freiwerdendem verfügbaren Einkommen, das an anderer Stelle ausgegeben werden kann und dort wiederum zu mehr Produktion und Umweltbelastung führt. Das verfügbare Einkommen ist in den Szenarien hingegen nicht gleich, wenn beispielsweise in einem von Suffizienz geprägten Verhalten-Szenario die Menschen bewusst entscheiden, weniger zu arbeiten als im Baseline-Szenario – die Menge an angebotener Arbeit also geringer ist. In diesem Fall fiele auch das freiwerdende verfügbare Einkommen geringer aus. Dieser Fall wurde in der vorliegenden Studie jedoch nicht untersucht.

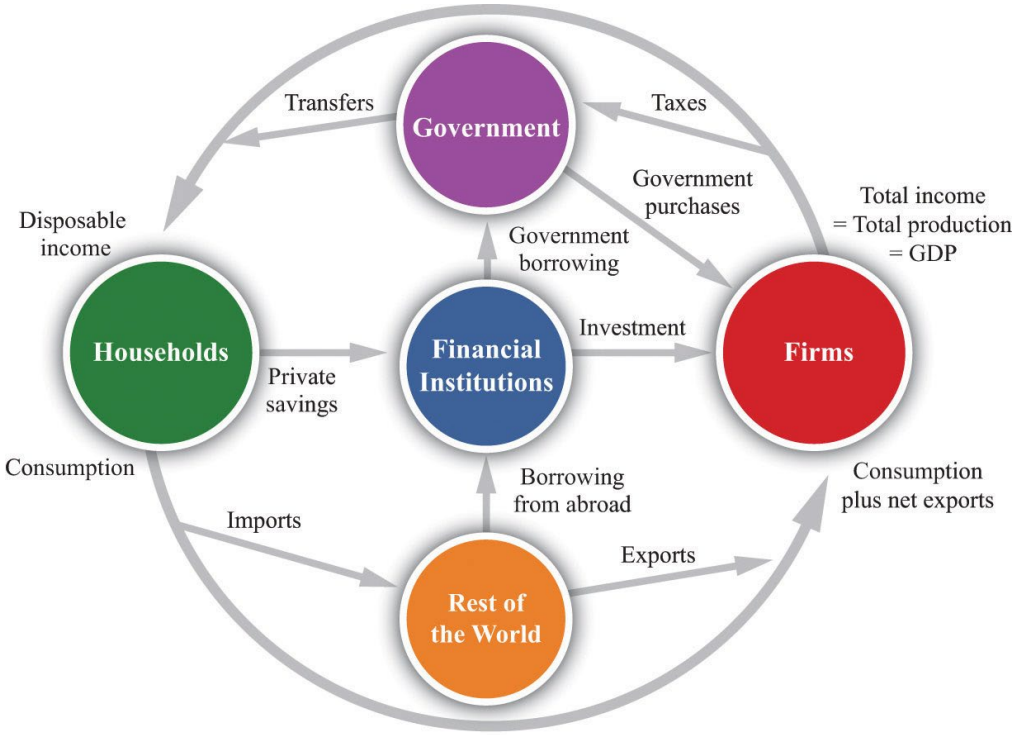
Die beschriebenen Effekte werden in dieser Studie als Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen bezeichnet. Dieser Begriff sollte klar abgegrenzt werden vom allgemeinen Begriff der Rebound-Effekte, die sich meist auf die mikroökonomische Ebene beziehen (vgl. Box "Exkurs: Rebound-Effekte").

Aus einer gesamtwirtschaftlichen Logik heraus ist es denkbar, dass das freiwerdende verfügbare Einkommen von den privaten Haushalten (Konsum), den Unternehmen (Investitionen) oder dem Staat ausgegeben wird (vgl. Abbildung 3-9). Beispielsweise könnte das freiwerdende Einkommen von den Haushalten nicht für andere Güter und Dienstleistungen ausgeben, sondern gespart werden. Dies könnte wiederum zu verbesserten Bedingungen und damit mehr Nachfrage nach Investitionen führen. Abschließend lässt sich daher nicht beantworten, ob die Einkommenseffekte zu mehr Konsum, Investitionen oder Staatsausgaben führen. Auch die für die Maßnahmen nicht ausformulierte politische Instrumentierung spielt hier eine Rolle. In das Narrativ eines stark technisch geprägten Szenarios passt beispielsweise eine zusätzliche Investitionsnachfrage. In das Narrativ eines durch das Verhalten der Konsumenten geprägtes Szenario passt die Verwendung des freiwerdenden verfügbaren Einkommens für weniger umweltbelastende Konsumbereiche. Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten werden in der Modellierung jedoch umwelt- und sozioökonomische Wir-

kungen für unterschiedliche Ausprägungen dieses Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen quantifiziert und zusätzlich zu den Ergebnissen aus der ersten Modellierungsrunde als Bandbreite angegeben.

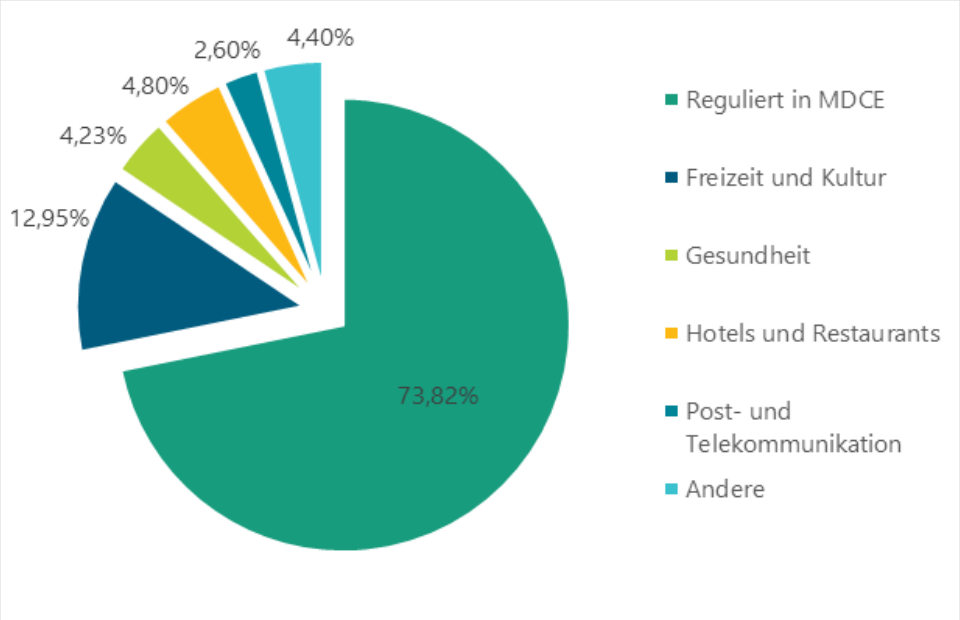
Für die Modellierung des Rebounds wurde zunächst das freiwerdende Einkommen in den Szenarien ermittelt und dann je nach analysierter Ausprägung in unterschiedlichen Nachfragebereichen wieder verausgabt. Im Technologie-Szenario entspricht dies einem Impuls von 40 Mrd. €, im Verhalten-Szenario 150 Mrd. € und im Mix-Szenario insgesamt 170 Mrd. €.

Abbildung 3-9: Volkswirtschaftliche Kreislauflogik



Quelle: Neofotografi (2023)

Abbildung 3-10: Durchschnittliche Nachfrage von privaten Haushalten in Deutschland nach Konsumbereichen (arithmetisches Mittel 2019-2021)



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten von destatis 2023a

Das Statistische Bundesamt veröffentlicht die durchschnittlichen Konsumausgaben privater Haushalte nach Bereichen, die sich in weiten Teilen mit den Handlungsfeldern dieser Studie decken. Die für diese Studie aufgrund ihrer hohen Umweltbelastung ausgewählten und mit CE-Maßnahmen hinterlegten neun Sektoren umfassen 74 % des durchschnittlichen Konsums der privaten Haushalte. Das betrifft die Bereiche Wohnen, Energie und Wohnungsinstandhaltung (36 %), Nahrungsmittel (15 %), Verkehr (13 %), Innenausstattung und Haushaltsgeräte (6 %) und Bekleidung und Schuhe (3,8 %). In der MDCE-Studie nicht näher betrachtete Konsumbereiche sind Freizeit, Unterhaltung und Kultur (13 %), Gesundheit (4,2 %), Hotels und Restaurants (4,8 %), Post und Telekommunikation (2,6 %) sowie „Andere“ als Zusammenfassung von Bildung (0,7 %) und anderen Waren und Dienstleistungen (3,7 %). Eine mögliche Ausprägung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen, die in dieser Studie analysiert wird, betrifft die Verschiebung des Konsums von den in der MDCE-Studie näher betrachteten Nachfragefeldern hin zu den nicht näher betrachteten Konsumbereichen. Für diese Bereiche wird das freiwerdende verfügbare Einkommen verausgabt. Dieses Vorgehen liegt zum einen darin begründet, dass für die Nachfrage der neun betrachteten Sektoren detaillierte Bottom-up-Abschätzungen gemacht wurden, die auf diese Weise unangetastet bleiben. Zum anderen zeichnen sich die nicht näher betrachteten Nachfragefelder durch vergleichsweise geringe Umweltbelastung aus, wodurch auch die durch den Rebound entstehenden Umwelteffekte vergleichsweise gering ausfallen und somit eine untere Grenze darstellen.

In einer weiteren analysierten Ausprägung des Rebounds wird das freiwerdende verfügbare Einkommen in Maschinen und Ausrüstungen investiert. Hierbei wird die Nachfragestruktur nach Investitionen aus EXIOBASE zugrunde gelegt. Investitionen in Gebäude wurden dabei ausgeklammert, da sie zu den betrachteten MDCE-Sektoren gehören.

Eine klare Trennung zwischen betrachteten und nicht betrachteten Sektoren ist jedoch nicht möglich. Einige nicht direkt betrachtete Nachfragebereiche, die durch das freiwerdende Einkommen einen Impuls erhalten, wie z.B. Gastgewerbe und Gesundheit, überschneiden sich mit Sektoren der MDCE-Studie, wie z.B. Nahrungsmittel und Hochbau. Das kann zu einer Überschätzung des Rebounds führen. Darüber hinaus sind die Sektoren nicht immer repräsentativ für einen gesamten

Konsumbereich, z.B. ist der Luftfahrtsektor im Konsumbereich Verkehr nicht durch CE-Maßnahmen abgedeckt. Da aber Verkehr als Ganzes zu den neun näher betrachteten Sektoren gezählt wird, wird eine mögliche Verausgabung des freiwerdenden Einkommens für beispielsweise mehr Flugverkehr nicht einbezogen, was zu einer Unterschätzung des Rebounds führen kann.

Die angenommene Preisparität zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen stellt eine weitere Quelle für Unsicherheit dar, da sie die Höhe des freiwerdenden Einkommens betrifft (Zink und Geyer 2017). Eine weitere Unsicherheit betrifft das zeitliche Auftreten des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen. Beispielsweise können die Anschaffungskosten für ein langlebiges Produkt zunächst höher sein, die Einsparungen aufgrund der höheren Lebensdauer werden aber erst zu einem späteren Zeitpunkt erzielt. Da in manchen Sektoren (z.B. IKT und Haushaltsgeräten) mit Lebenszykluskosten gearbeitet wurde, ist hier eine gewisse Unschärfe gegeben. Auch wenn dies in Summe in der vorliegenden Studie nicht der Fall ist, kann bei Blick auf einzelne Maßnahmen zudem in vielen Fällen davon ausgegangen werden, dass die Kosten der CE-Maßnahme höher sind als Ersparnisse bzw. die Ersparnisse im Vergleich zu hohen Anfangsinvestitionen über einen großen Zeitraum verteilt sind und somit vernachlässigt werden können.

Trotz der Unsicherheiten und des weiteren Forschungsbedarfs ist es sinnvoll, den Rebound durch freiwerdendes Einkommen in die Analyse einzubeziehen, da es sich ansonsten um eine Teilbetrachtung handelt, die auf die Wirkung der veränderten Nachfrage in den betrachteten Gütergruppen der neun Sektoren beschränkt ist. Eine Analyse, die den Rebound mit einbezieht, kann zu einer ganzheitlicheren Einschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen führen. Um die dargestellten Potenziale durch CE-Maßnahmen zu erreichen, sind Politikinstrumente erforderlich, die den dargestellten Nachfragerückgang in den gewählten Handlungsfeldern absichern und in ihrer Ambition die gegenläufige Wirkung von Rebound-Effekten berücksichtigen. Dies betrifft nicht nur den in dieser Studie analysierten Rebound durch freiwerdendes Einkommen, sondern Rebound-Effekte im Allgemeinen (vgl. Exkurs). Neben weiterem Forschungsbedarf ergibt sich aufgrund der bestehenden Unsicherheit eine hohe Relevanz für die wissenschaftliche Begleitung der Gesetzgebung, Implementierung und möglicher Revisionen in Bezug auf Rebounds.

Exkurs: Rebound-Effekte

Die in Kapitel 3.5.5 beschriebene Verausgabung des durch die CE-Maßnahmen freigewordenen verfügbaren Einkommen in anderen Nachfragebereichen und dadurch entstehende Umwelt- und sozioökonomische Wirkungen werden in dieser Studie als Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen bezeichnet. Dieser Begriff sollte klar abgegrenzt werden vom allgemeinen Begriff der Rebound-Effekte, die sich meist auf die mikroökonomische Ebene beziehen und auf die in diesem Exkurs eingegangen wird. Die hier beschriebene Art von Rebound-Effekten wurde in der Studie nicht betrachtet.

Erklärtes Ziel einer Circular Economy ist es, den absoluten Verbrauch an Energie und Rohstoffen drastisch zu senken. Ein häufig verfolgter Ansatzpunkt dabei ist es, die Ressourceneffizienz von Produkten und Dienstleistungen zu erhöhen und damit Energie und Rohstoffe einzusparen. Trotz maßgeblicher Verbesserungen der Effizienz in verschiedenen Sektoren während der letzten Jahre blieben absolute Reduktionen des Verbrauchs aber oft aus (Wüst et al. 2022). Die Ursache dafür können sogenannte Rebound-Effekte sein.

Rebound-Effekte können nach der erfolgreichen Umsetzung von Effizienzmaßnahmen auftreten. Die durch die Effizienzsteigerung erwartete Verminderung des Ressourcenverbrauchs wird dabei abgeschwächt oder bleibt sogar ganz aus (Wüst et al. 2022). In extremen Fällen kann der absolute Ressourcenverbrauch sogar höher sein als vor der Effizienzmaßnahme, man spricht dann von einem „Backfire“-Effekt.

Der Grund für Rebound-Effekte liegt in Verhaltensänderungen, mit denen Personen oder Unternehmen auf Effizienzgewinne reagieren. Die durch die höhere Effizienz eingesparten Mittel werden dabei auf eine Weise

eingesetzt, die einen zusätzlichen Ressourcenverbrauch nach sich zieht. Wenn mit Effizienzsteigerungen ökologische Entlastungen angestrebt werden, stellen Rebound-Effekte somit Wirkungsdefizite von Effizienzmaßnahmen dar (Wüst et al. 2022). Um sie zu vermeiden und um tatsächlich den absoluten Ressourcenverbrauch zu senken, ist ein Bewusstsein für und eine Erfassung der Problematik sowie ein aktives Gegensteuern notwendig.

Rebound-Effekte können sowohl auf der Ebene von Konsument*innen als auch auf Unternehmensebene beobachtet werden. Sie können direkt wirken (unmittelbar auf die Effizienzsteigerung folgend), z.B. wenn ein Auto durch einen geringeren Treibstoff-Verbrauch häufiger gefahren werden kann oder wenn Kleidung im Second-Hand-Laden günstig erworben wird, diese aber zusätzlich gekauft wird und dadurch nicht weniger neue Kleidung erworben wird. Sie können aber auch indirekte Wirkung entfalten (unmittelbar und in größerem zeitlichem Abstand). Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Einsparungen durch einen geringeren Treibstoff-Verbrauch oder günstige Second-Hand-Kleidung für zusätzliche andere Konsumgüter verwendet werden (Wüst et al. 2022). Je nachdem, wofür eingesparte Mittel eingesetzt werden, lassen sich verschiedene Typen von Rebound-Effekten abgrenzen (Einkommens- und Substitutionseffekte auf Verbraucherseite und Output-Effekte, Faktorsubstitutionseffekte sowie Re-Investment, Re-Design und Embodied Energy auf Unternehmensseite; Wüst et al. 2022).

Die Ursachen für die Effekte können ökonomischer, technischer, psychologischer oder sozialer Natur sein (Wüst et al. 2022). Ökonomische Ursachen sind gegeben, wenn finanzielle Einsparungen zu mehr Konsum oder einer erweiterten Produktion führen. Technische Ursachen können vorkommen, wenn durch die Effizienzsteigerungen zusätzliche Ressourcen z.B. im Rahmen von Leistungssteigerungen aufgewendet werden. Psychologische Ursachen beispielsweise liegen vor, wenn Verbraucher Produkte wegen ihrer gesteigerten Effizienz als umweltfreundlicher wahrnehmen und sie in der Folge mehr nutzen. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn elektrisch betriebene Fahrzeuge als für die Umwelt unschädlich betrachtet und daher mit gutem Gewissen deutlich intensiver genutzt werden oder wenn Second-Hand-Kleidung als nachhaltig wahrgenommen und deshalb im Übermaß erworben wird. Soziale Gründe können Routinen und Alltagspraktiken sein, beispielsweise, wenn Effizienzsteigerung bei der Beheizung von Gebäuden zu gewohnheitsmäßig komfortorientieren Heizpraktiken führen.

Die in der Literatur aufgezeigte Streuung unterschiedlich hoch eingeschätzter Rebounds zeigt die Komplexität des Forschungsgegenstandes und die damit verbundenen Unsicherheiten. Abschätzungen für die Ebene der Konsument*innen kommen einer Übersichtsstudie zufolge zu ähnlichen Ergebnissen (privates Mobilitätsverhalten 10-30 %, Beheizung von Wohnräumen 10-30 %, Kühlung von Wohnräumen 1-26 %; Jenkins et al. (2011). Auf Seiten der Produktion weisen Studien jedoch drastisch unterschiedliche Ergebnisse auf. Die angenommene Stärke von Rebound-Effekten variiert hier zwischen 4 % und 334 % (Wüst et al. 2022). Die betrachteten Untersuchungen fanden meist auf Branchen- oder Sektorebene statt und konzentrierten sich überwiegend auf Energieverbräuche in Produktionsprozessen der Leicht- und Schwerindustrie sowie auf Treibstoffverbräuche des Warentransports. Llorca und Jamasb (2017) zufolge wurden beim Warentransport in 15 EU-Staaten zwischen 1996 und 2012 nur etwa 4 % der Einsparungen an Treibstoff durch Rebound-Effekte aufgezehrt. Im Bereich der schwedischen Stahlindustrie wird bezüglich des Elektrizitätsverbrauchs für die Jahre 2000 bis 2008 ein Rebound-Effekt von 86 % angenommen, hier wird ein Großteil der Einsparungen aufgezehrt (Amjadi et al. 2018). Ein ausgeprägter „Backfire“-Effekt wird von Li und Lin (2017) festgestellt, deren Studie sich auf die Schwerindustrie in China bezieht und für den Zeitraum von 1994 bis 2012 einen Rebound-Effekt von 334 % angibt. Maßgebliche Faktoren für die großen Unterschiede sind der geographische Rahmen sowie Untersuchungszeiträume und -kontexte (Wüst et al. 2022). Da bisherige Studien überwiegend direkte Effekte betrachten und räumlich oder zeitlich weiter entfernte Wirkungen ausklammern, ist davon auszugehen, dass das gesamte Ausmaß von Rebound-Effekten insgesamt eher unterschätzt wird (Wüst et al. 2022; Dimitropoulos 2007; Barker et al. 2009). Auf der Ebene ganzer Volkswirtschaften schätzen makroökonomische Studien die Minderung der Einsparungen auf 50 % (Brockway et al. 2021; Wüst et al. 2022).

3.5.6 Kritikalität

Während die Prinzipien der CE darauf abzielen, Materialien möglichst effizient zu nutzen und möglichst lange im Kreislauf zu halten, zielt Kritikalität auf die Rohstoffversorgungssicherheit von Primärmaterialien für die industrielle Produktion ab.

Zusammenhang der Konzepte *Circular Economy* und *Kritikalität*

Das Konzept der Rohstoffkritikalität entstand ursprünglich im militärischen Kontext. Die Rohstoffversorgung sollte im Sinne nationaler Sicherheit eingeschätzt und gewährleistet werden (Peck 2019). Seit Mitte der 2000er Jahre wurden verschiedene Konzepte zur Bewertung der Rohstoffkritikalität entwickelt, die vermehrt wirtschaftliche Aspekte in den Vordergrund stellen (NRC 2008; EC 2010). Meist beruht die Kritikalitätsbewertung auf einer zweidimensionalen Risikoanalyse. Dabei wird die Kritikalität eines Rohstoffs aus der Wahrscheinlichkeit eines Versorgungsengpasses, sowie dem Schadensausmaß des Versorgungsengpasses im betrachteten System ermittelt. Ein Rohstoff wird demnach als kritisch angesehen, wenn die Versorgung hohen Risiken ausgesetzt ist, und er zudem eine essenzielle wirtschaftliche Bedeutung hat (Glöser et al. 2015).

Auch wenn das Kernziel der Kritikalitätsanalyse, die Gewährleistung der Rohstoff-Versorgungssicherheit, für die CE nicht explizit relevant ist, gibt es zwischen den beiden Konzepten grundsätzliche Zusammenhänge (Tercero Espinoza 2020).

- Sinkt der Rohstoffbedarf einer Gesellschaft durch materialeinsparende (*Reduce, Refuse, Repurpose*, siehe Tabelle 3-4, lebensdauerverlängernde CE-Maßnahmen), sinkt damit die Vulnerabilität gegenüber einem Versorgungsengpass (sofern dieser kein vollständiger Lieferstopp ist). Die betroffenen Rohstoffe können durch die Nachfragereduktion als weniger kritisch angesehen werden.
- Werden Rohstoffe vermehrt aus Schrotten zurückgewonnen (*Recycle*) und vor Ort (in dieser Studie in Deutschland) recycelt werden, steigt das lokale Angebot der jeweiligen Rohstoffe. Dadurch kann ein größerer Anteil des Bedarfs aus lokalen Quellen gedeckt werden, und das Risiko eines Versorgungsengpasses sinkt. Die betroffenen Rohstoffe gelten daher als weniger kritisch.
- Bei Maßnahmen zum Design for Circularity (*Rethink*) ist das Zusammenspiel der beiden Konzepte fallabhängig. Wird beispielsweise ein Material durch ein anderes ersetzt, damit das Endprodukt besser recycelt werden kann, kann sich die Versorgungssicherheit verbessern (d.h. der Rohstoff wird durch einen weniger kritischen ersetzt), verschlechtern (d.h. der Rohstoff wird durch einen kritischeren ersetzt), oder unverändert bleiben (d.h. der Rohstoff wird durch einen ähnlich kritischen ersetzt). Werden die Massenverhältnisse der Bestandteile verändert, muss ebenfalls der Einzelfall betrachtet werden.
- Wird im Sinne der CE für ein bestimmtes Produkt oder in einem bestimmten Sektor vermehrt Sekundärmaterial in der Herstellung eingesetzt, hat dies keinen direkten Einfluss auf die Versorgungssicherheit im Sinne der Kritikalitätsbewertung. Das Angebot eines Rohstoffs, sei es primär oder sekundär, wird über die gesamte Volkswirtschaft betrachtet. Die Verteilung der Rohstoffnutzung auf verschiedene Sektoren innerhalb einer Volkswirtschaft verändert weder den Gesamtbedarf noch das -angebot des Rohstoffs. Weil man davon ausgeht, dass das Potenzial der Sekundärproduktion noch nicht voll ausgeschöpft ist (z.B. hinsichtlich Schrottsammlung, Sortierung oder Recyclinganlagen), ist eine erhöhte Nachfrage nach Sekundärmaterial aber durchaus ein wirtschaftlicher Ansporn zum Ausbau der Sekundärproduktion. Steigt durch eine zusätzliche Nachfrage nach Sekundärmaterialien deren Marktwert, können bisher zwar technisch machbare, aber unwirtschaftliche Prozesse für die Recyclingindustrie finanziell lohnend werden. Damit können betriebswirtschaftliche, volkwirtschaftliche und ökologische Interessen in Einklang gebracht werden, denn ein Ausbau der Sekundärrohstoffproduktion ist ein grundlegendes volkwirtschaftliches

und Umweltziel. Eine vermehrte Sekundärproduktion verringert den Einsatz primärer Rohstoffe und vermindert zudem die Importabhängigkeit[12] und die Mengen zu deponierender Reststoffe. In den meisten Fällen wird sinkt im Vergleich zur Primärproduktion auch der Energiebedarf und folglich die Treibhausgasemissionen (BGR 2022).

- Die thermische Endverwertung (*Recover*) hat ebenfalls keine direkte Wirkung auf die Versorgungssicherheit. Die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen (organischen) Materialien hinterlässt jedoch metallische Rückstände, die dadurch in der Verbrennungsschlacke in einer höheren Konzentration zurückbleiben (etwa 6 Gewichtsprozent Metalle). Vor allem Massenrohstoffe wie Aluminium, Eisen und Zink können aus den Schlacken wiedergewonnen und in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden (Quicker und Stockschäder 2018). Die Mengen fallen im Vergleich zum Gesamtbedarf aber kaum ins Gewicht. 2020 wurden in Deutschland beispielsweise 1 kt Aluminium (etwa 1 % des Gesamtkonsums) aus Verbrennungssschlacken zurückgewonnen (Eurostat 2023a).

Tabelle 3-4: Zusammenhänge zwischen Circular Economy- und Kritikalitätskonzepten

Ziel der Maßnahme	R-Strategie	Wirkungsweise	Effekt auf Versorgungssicherheit
Materialeinsparung	Reduce Refuse Repurpose	Bedarf sinkt	positiv
Lebensdauerverlängerung	Reuse Repair Remanufacture Refurbish Repurpose	Bedarf sinkt	positiv
Vermehrte Rückgewinnung	Recycle	Lokales Angebot steigt	positiv
Vermehrter Einsatz Sekundärmaterial	Recycle	Keine direkte Wirkung, kann aber indirekt zu mehr Recycling führen	fallabhängig
Design for Circularity	Rethink	fallabhängig	fallabhängig
Thermische Verwertung	Recover	Keine direkte Wirkung, kann aber Metallrückgewinnung aus Aschen ermöglichen	keine bis geringfügig positiv

Quelle: Eigene Darstellung

Vorgehen bei der Bewertung

Für die verschiedenen CE-Maßnahmen wurde das Potenzial, die Versorgungssicherheit zu verändern, abgeschätzt. Dafür wurden pro ausgewähltem Rohstoff die durch die CE-Maßnahmen hervorgerufenen Rohstoffeinsparungen bzw. die Erhöhung des Rohstoffangebots aus dem Recycling abgeschätzt und in Relation zum Bedarf des Rohstoffes gesetzt. Das Vorgehen ist schematisch und anhand eines Beispiels in Abbildung 3-11 dargestellt.

[12] Je stärker die Importabhängigkeit, desto größer das Risiko eines Versorgungsengpasses durch (geo)politische/wirtschaftliche/praktische Hindernisse.

Es wurden 43 Rohstoffe betrachtet, die in der Vorstudie ausgewählt wurden, weil sie entweder von der Europäischen Kommission als "kritisch" eingestuft wurden oder weil ihre Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden ist (vgl.Prakash et al. 2022). Die Kritikalität wird dabei ausdrücklich nicht neu bewertet. Für jeden betrachteten Sektor wurden zunächst die relevanten Rohstoffe aus dieser Vorauswahl identifiziert. Dazu wurden die Endnutzungen der Rohstoffe gemäß den EU Critical Raw Material Fact Sheets (EC 2020b; 2020c; 2020d) zugeordnet und der Sektoranteil bestimmt. Mangels besserer Daten wird hier angenommen, dass die ausgewählten Rohstoffe in Deutschland in ähnlicher Weise wie in der gesamten EU genutzt werden; somit werden die EU-Sektoranteile im Rohstoffbedarf für Deutschland übernommen. Bei Bedarf und Möglichkeit detaillierterer Aufteilung wurde zusätzliche Fachliteratur herangezogen. Der jährliche Rohstoffkonsum Deutschlands wurde nach Bevölkerungsanteil[13] aus den EU-27-Bedarfen errechnet (destatis 2023b).

Tabelle 3-5: Katalog betrachteter Rohstoffe

Kategorie	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 (Cer, Lanthan, Neodym, Praseodym, Samarium), Bismut, Germanium, Indium, Wolfram, Niob, Beryllium, Scandium, Gallium, Borate, Schwere Seltene Erden (Dysprosium, Erbium, Europium, Gadolinium, Holmium, Lutetium, Terbium, Thulium, Ytterbium, Yttrium), 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

Hinweis: Orange = kritisch gemäß EU-Bewertung und hohes Umweltgefährdungspotenzial; Gelb = nicht kritisch gemaß EU-Bewertung, aber hohes Umweltgefährdungspotenzial.
Quelle: Prakash et al. 2022)

Die Veränderungen an Materialbedarf oder -angebot wurden mit dem jährlichen Rohstoffbedarf Deutschlands ins Verhältnis gesetzt (vgl. Loibl et al. 2020). Je nach Art der Maßnahme wurde einer der folgenden Ansätze gewählt:

- CE-Maßnahmen zur Bedarfsreduktion:

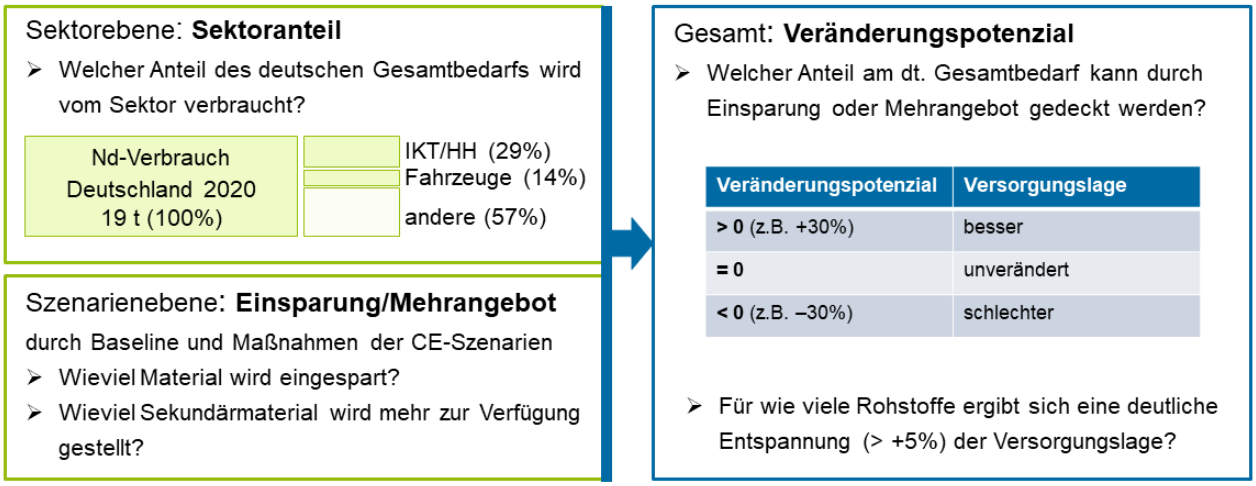
  Die Veränderung des Gesamtbedarfs des jeweiligen Rohstoffs (in %) errechnet sich aus dem Produkt des Veränderungspotenzials der Maßnahme (in %) und dem Sektoranteil des jeweiligen Rohstoffs (in %). Die ausgeprägtesten prozentualen Veränderungen ergeben sich, wenn der Bedarf eines Rohstoffs innerhalb des Sektors durch eine Maßnahme stark reduziert wird, und der Sektor zugleich einen großen Anteil des Gesamtbedarfs Deutschlands für den gegebenen Rohstoff abdeckt.

- CE-Maßnahmen zur Erhöhung des lokalen Angebots:

[13] Die Bevölkerung in Deutschland entspricht 19 % der EU-Bevölkerung destatis (2023b).

Der Anteil des zusätzlichen Angebots durch Recycling (in %) wird als Quotient des mehrrecycelten Materials (in t) und des Gesamtbedarfs Deutschlands am jeweiligen Rohstoff (in t) errechnet. Das Veränderungspotenzial ist dann am größten, wenn eine große Menge Rohstoff zusätzlich zur Verfügung gestellt werden kann, und der absolute Gesamtbedarf Deutschlands für den jeweiligen Rohstoff gering ist.

Abbildung 3-11: Kenngröße Veränderungspotenzial und Fragestellungen



Hinweis: Der Sektoranteil ist am Beispiel Neodym (Nd) dargestellt.
Quelle: Eigene Darstellung.

Maßnahmen zur Angebotserhöhung und zur Bedarfsreduktion gilt es klar zu unterscheiden. Das lokale Angebot an Sekundärrohstoffen hängt vom (vergangenen) Rohstoffkonsum in Deutschland ab und dabei auch von Gütern und Produkten, die im Ausland produziert werden. Die Bedarfsreduktion bezieht sich auf Rohstoffe, die die deutsche Industrie zur Produktion in Deutschland benötigt.

Je nach Datenverfügbarkeit wurde das Veränderungspotenzial der CE-Maßnahmen entweder

- rohstoffübergreifend betrachtet, d.h. es wird angenommen, dass sich Angebot oder Nachfrage aller Rohstoffe des Sektors gleichermaßen verändern; z.B., wenn sich die MDCE-Maßnahme auf die Nachfrage auswirkt, oder
- rohstoffspezifisch betrachtet, z.B. wenn es sich bei der MDCE-Maßnahme um vermehrtes Recycling handelt.

Die Effekte der CE-Maßnahmen auf die Versorgungssicherheit werden als relative Veränderungspotenziale quantifiziert. Dabei bedeutet ein positives Vorzeichen, dass sich die Versorgungslage entspannt, da entweder der Bedarf reduziert (z.B. durch Materialeinsparungen oder Lebensdauerverlängerung), oder das lokale Angebot erhöht wird (z.B. durch mehr Recycling). Die Importabhängigkeit Deutschlands sinkt. Ein negatives Vorzeichen bedeutet, dass sich die Versorgungssituation verschärft, da der Bedarf steigt (z.B. durch die verstärkte Nutzung eines Rohstoffs bei einer Technologieumstellung), oder das lokale Angebot sinkt (z.B. durch geringere Schrottverfügbarkeit).

Das Veränderungspotenzial des Baseline-Szenarios ist relativ zum Status quo angegeben und sagt aus, wie sich die Versorgungssicherheit bis 2045 verändert, wenn das Baseline-Szenario eintritt. Dabei gilt es zu beachten, dass die Rohstoffbedarfslandschaft zusätzlich zu den in dieser Studie abgedeckten technologischen Transformationen auch durch die Energiewende geprägt werden wird (Marscheider-Weidemann et al. 2021). Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-,

und Mix-Szenario sind relativ zur Baseline angegeben. Sie beschreiben, wie sich die Versorgungssicherheit 2045 gegenüber der Baseline verändern kann, wenn die entsprechenden CE-Maßnahmen umgesetzt werden.

Mit diesem Ansatz wird abgeschätzt, wie sich Bedarf und Mehrangebot der betrachteten Rohstoffe verändern werden bzw. können, wenn CE-Maßnahmen erfolgreich umgesetzt werden.

3.5.7 Externe Kosten

Im Rahmen der vorliegenden MDCE-Studie wurde der Ansatz Umweltkosten verwendet, um Kosten und Nutzen der modellierten CE-Maßnahmen im Sinne des Potenzials für die Vermeidung volkswirtschaftlichen Folgekosten bewerten zu können. Das Ziel war, die kurzfristigen Verlagerungseffekte in den Bereichen Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf in einer breiteren, ökonomischen Perspektive zu stellen, um die Notwendigkeit des ökologischen Transformationsbedarfs zu verdeutlichen.

3.5.7.1 Scope

Die ökologischen Wirkungen von Technologien, betrieblichen und sozialen Innovationen oder politischen Programmen lassen sich, je nach Zielstellung, auf unterschiedlichen Wegen und Abgrenzungen bewerten. Monetäre Bewertungsverfahren ermitteln Kosten in Geldeinheiten von Maßnahmen gegenüber einem Referenzszenario, und erlauben damit einen direkten Vergleich zu betriebs- oder volkswirtschaftlichen Kosten. Man spricht dabei von sozialen Kosten oder – nach Abzug internalisierter Bestandteile – von externen Kosten. Alternativ werden auch Bewertungsansätze in verlorenen Lebensjahren nach der Systematik des "Global Burden of Disease" (WHO 2020), entlang standardisierter Kategorien der Ökobilanzierung (Eutrophierung, Versauerung, globale Erwärmung, etc.) oder in Punktesystemen etwa durch multikriterielle Ansätze (naturräumliche Bewertung in BMVI 2016) angewandt. Aufgrund der Vergleichbarkeit mit volkswirtschaftlichen Ergebnissen sowie der Verbreitung für die politische Entscheidungsfindung wird in dieser Studie der monetäre Bewertungsansatz gewählt.

Auf Ebene der Wirkungskategorien sollten grundsätzlich alle Effekte erfasst werden, welche die zu bewertenden Technologien oder Maßnahmen auf Mensch und Umwelt haben können. Die Methodenkonvention 3.0 (UBA 2020b) schlägt für die Bereiche Energie und Verkehr Mid-Point-Kategorien entlang von Emissionen und betroffenen bzw. emittierenden Sektoren vor. Emissionen umfassen Treibhausgase und verschiedene Luftschadstoffe (Verkehr und Energie), Lärm (Verkehr), Stickoxide und Phosphor (Gewässer und Boden), Baustoffe sowie Klimakosten in der Landwirtschaft. Diese werden entlang des gesamten Produktlebenszyklus insbesondere von Kraftstoffen und Energieträgern (Brennstoffe, Strom) bewertet.

Die vorliegende Studie beschränkt sich auf den Leitindikator Treibhausgase (THG) durch direkte Emissionen und indirekt durch Veränderungen in der Landnutzung. Damit wird der anthropogene Einfluss auf den Klimawandel als eine der großen Herausforderungen dieses Jahrhunderts umfassend ökonomisch bewertet. Der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf lokales Mikroklima, Biodiversität, Lebensräume und Artenvielfalt wird hierdurch jedoch nicht erfasst.

a) Bewertung von Klimafolgen

Die Bewertung von THG-Emissionen kann grundsätzlich auf Basis von Schadens- oder von Vermeidungskosten erfolgen. Während die EU-Kommission mit Referenz auf CE Delft (2020) Vermeidungs-

kosten als besser bestimmbare Annäherung zu den Schadenskosten empfiehlt, konstatiert das Umweltbundesamt (UBA 2020b), dass globale Klimaschäden mittlerweile ausreichend präzise abgeschätzt werden können. Neben der Erfassung möglicher Wirkungsketten der globalen Erwärmung wird die Höhe von Klimaschadenskosten durch die Einkommens- oder Kapitalgewichtung Betroffener (Equity Weighting) sowie von der sozialen Präferenzrate bestimmt. Der Beschluss des Bundesverfassungsgerichts (BVerfG 2021) zur Klimagerechtigkeit vom 24.03.2021 hat zur sozialen Präferenzrate eine angemessene Gewichtung der Interessen zukünftiger Generationen angemahnt. Dies legt keine oder nur eine geringe Diskontierung zukünftiger Klimaschäden wie auch Kosten für die Emissionsminderung zukünftiger Generationen nahe. Entsprechend wird in dieser Studie eine Soziale Diskontrate von 0 % angesetzt. Weiter lässt sich die Frage der globalen Gerechtigkeit über die gewählte Kapitalgewichtung alternativ durch die global durchschnittliche Gewichtung aller Schäden (World Average Weights) oder über die Bewertung aller Schäden wie in Europa (Regional / EU-Weights) bewerten. Die Methodenkonvention spricht sich eindeutig für ein Equity Weighting mit dem westeuropäischen Durchschnittseinkommen für alle globalen Schäden aus (UBA 2020b).

Neben Treibhausgasen bietet die Methodenkonvention 3.0 des UBA (2020) Kostensätze für die Bewertung weiterer atmosphärischer Emissionen wie Stickoxide (NO_X) und Partikel (PM) sowie Lärm an. Deren lokale Wirkung lässt sich mit dem im Rahmen dieser Studie verwendeten Modellwerkzeug jedoch nicht ausreichend gut erfassen. Ferner lassen sich Luftschadstoffe und – mit Abstrichen – Lärm auf technologischem Wege leichter reduzieren als THG-Emissionen. Diese werden aus beiden Gründen in der Analyse von externen Kosten nicht weiter betrachtet. Nichtsdestotrotz sei darauf hingewiesen, dass Luftschadstoffe gerade in den Metropolen des globalen Südens für einen wesentlichen Teil von Krankheitslasten und vorzeitigen Todesfällen verantwortlich sind (WHO 2020).

b) Bewertung von Landnutzungsänderungen

Bei der Bewertung der externen (oder sozialen) Kosten der Landnutzung konzentriert sich diese Studie auf den Faktor Klimawirkung. Dieser ergibt sich durch das Potenzial von Naturräumen zur Speicherung von Treibhausgasen (Senke) oder deren Risiko zur Abgabe von Klimagasen (IPCC 2022). Entsprechend definiert die UN-Rahmenkonvention Klimawandel (UNFCCC 2013) und die entsprechende Verordnung 2018/841/EU der EC (2018) den Emissionsbereich Land Use, Land Use Change und Forestry (LULUCF). Der sechste Assessment Report des IPCC (2023) grenzt den Sektor Agriculture, Forestry and other Land Use (AFOLU) noch etwas weiter ein. Die Emissionsfaktoren hängen von der Lage in globalen Klimazonen sowie der Art der Nutzung und Bewirtschaftung ab. Insofern kann eine globale Bewertung von Klimawirkungen durch Landnutzungsänderungen im Rahmen dieser Studie nur einen groben Hinweis auf die mögliche Größenordnung geben – die tatsächlichen Effekte werden durch alternative Nutzung der freiwerdenden Flächen bestimmt.

Mit Daten aus den Jahren 2007 bis 2016 schätzt der IPCC Special Report Climate Change and Land (IPCC 2022), dass etwa 23 % der 40 Gt jährlich durch menschliche Aktivitäten emittierten Treibhausgasemissionen auf Landnutzungsänderungen zurückzuführen sind. Hierbei spielen Methan (CH_4) und Lachgas (N_20) eine bedeutende Rolle. Dabei ist etwa ein Viertel der eisfreien Landfläche der Erde durch menschliche Nutzung geprägt. Die Bodenerosion durch landwirtschaftliche Nutzung übersteigt die natürliche Regenerationsrate um das 10- bis 100-fache. Die Landwirtschaft ist ferne für etwa 70 % Nutzung von Süßwasser verantwortlich, und von den angebauten Lebensmitteln werden zwischen 25-30 % verschwendet oder gehen verloren. Hierdurch entstehen zusätzliche THG-Emissionen. Insgesamt bewegen sich die THG-Emissionen der Nahrungsverarbeitung in einer ähnlichen Größenordnung wie die Emissionen durch die Nutzung von Flächen für Weide- und Agrarland selbst. Diese werden im Rahmen der Analyse der externen Kosten jedoch nicht bewertet.

Im Rahmen dieser Studie wird aufgrund der räumlichen Auflösung der Szenarien-Ergebnisse lediglich die Flächenwirkung von Natur- und Landschaft nach den Kategorien Ackerland, Wald, Weideland und sonstige berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.5.4). Für diese werden mittels der Abschätzungen der anthropogenen THG-Emissionen nach IPCC (2022) und der Bewertung der monetären Kosten von THG-Emissionen analog zur direkten Emissionsbewertung globale volkswirtschaftliche Nutzen einer geringeren Inanspruchnahme von Flächen ermittelt.

Der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Biodiversität ist von den Größen von Flächen nach Landnutzungs- und Bewirtschaftungsart und von deren globaler Verteilung abhängig. Darüber hinaus wird die Funktion von Naturräumen als natürliche Habitate auch durch die Zerschneidung durch Verkehrswege, Siedlungen oder Energieanlagen bestimmt. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 3.5.4 und wegen eines fehlenden wissenschaftlichen Konsenses bezüglich angemessener globalerer Kostensätze wird die Ökosystemdienstleistung intakter Flächen zum Erhalt der Biodiversität im Rahmen der Analyse der externen Kosten nicht monetär bewertet. Dies gilt auch für soziale Effekte von Landnutzungsänderungen etwa auf Arbeitsplätze oder die Versorgung mit Lebensmitteln speziell im globalen Süden. Es sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die globalen sozialen Folgekosten eine intensivierten Landnutzung auf die Artenvielfalt, und damit auf die Grundlagen menschlicher Existenz, schwerwiegender sein können als die isoliert betrachteten Folgen des anthropogenen Klimawandels.

3.5.7.2 Methode

Wertansätze direkter Treibhausgasemissionen

Sowohl Schätzungen globaler THG-Schadens- als auch Vermeidungskosten gehen von steigenden Wertansätzen zukünftiger Emissionen aus. Während dies bei Vermeidungskosten mit der Ausschöpfung günstiger Maßnahmen heute begründet wird, geht die Schätzung von Schäden davon aus, dass sich das globale Klimasystem weiter auf Kippunkte zubewegt und somit sensibler wird. Für die vorliegende Studie werden entsprechend Kostenschätzungen für das Zieljahr der Szenarien 2045 herangezogen.

Tabelle 3-7 gibt die Schätzung von Schadenskosten für die Jahre 2020, 2030 und 2050 nach UBA (2020d) mit 1 % und 0 % Zeitpräferenzrate, einer linearen Interpolation für 2045 und einem auf 2022 angepassten Preisstand an. Hiermit ergibt sich ein globaler Kostensatz von 790 $€_{2022}$/t CO_2-Äq zur Bewertung von THG-Emissionen bei voller Berücksichtigung zukünftig auftretender Schäden. Für die Bewertung von Klimaschäden spielen der emittierende Sektor und der Emissionsort keine Rolle. Dieser Kostensatz wird entsprechend auf alle Wirtschaftsbereiche und Szenarien angewandt.

Tabelle 3-6: Kostensatz zur Bewertung von Klimaschäden

Zeitpräferenz und Preisstand	2020	2030	2045	2050
1 % Zeitpräferenz [$€_{2020}$/t CO_2-Äq]	195	215	241	250
0 % Zeitpräferenz [$€_{2020}$/t CO_2-Äq]	680	700	749	765
0 % Zeitpräferenz [$€_{2022}$/t CO_2-Äq]	717	739	790	807

Quelle: (UBA 2020d), Preisstand nach Eurostat HICP

Wertansätze für THG-Emissionen durch Änderungen der Landnutzung

Die Inanspruchnahme von Land durch industrielle Prozesse, Verkehr oder Wohnungsbau wirkt sich sowohl auf die globale Erwärmung als auch auf die Biodiversität aus. Zur Bewertung landnutzungsbedingter THG-Emissionen werden die Abschätzungen anthropogener Effekte für die zusammengefassten Kategorien Agriculture (Acker- und Weideland) sowie FOLU (Forestry and other Land Use) aus IPCC (2022) herangezogen. Diese lassen sich über die Anteile der Nutzungsformen an der globalen eisfreien Landfläche von 13 Millionen km² auf Emissionen je Hektar (ha) umrechnen. Aus den Bandbreiten von Flächenanteilen und THG-Emissionsbeiträgen nach IPCC (2022) werden hier lediglich die zentralen Schätzungen verwendet.

Zur Ermittlung monetärer Nutzen werden die THG-Emissionen durch Landnutzungsänderungen mit den Kostensätzen nach Tabelle 3-6 multipliziert. Damit ergeben sich Kostensätze von rund 3140 €/ha für renaturierte Acker- und Weideflächen, sowie von 1500 €/ha für aus der Bewirtschaftung entlassenen Wald.

Tabelle 3-7: Kostensatz zur Bewertung von Klimaschäden durch Änderung der Landnutzung

Art der Landnutzung und Bewirtschaftung	Anteil an globaler eisfreier Landfläche	Gesamte bewirtschaftete Landfläche	Anthropogene THG-Emissionen gesamt	Spezifische anthropogene THG-Emissionen	Spez. externer Nutzen
	Prozent	1000 ha	Gt CO_2-Äq/a	t CO_2-Äq/ ha	€/ha
Bewässertes Agrarland	*2 %*	*260 000*	6,2	3,97	3 140
Bewässertes Agrarland	*10 %*	*1 300 000*			
Landwirtschaft gesamt	12 %	1 560 000			
Infrastruktur	*1 %*	*130 000*	5,8	1,94	1 532
Plantagenwälder	*2 %*	*260 000*			
Nutzwald	*20 %*	*2 600 000*			
Forstwirtschaft und sonstige	23 %	2 990 000			

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von IPCC (2022).

Hinweis: Der Ansatz unterstellt, dass aus der wirtschaftlichen Nutzung entlassene Flächen renaturiert werden, und somit mittel- bis langfristig deren natürliche Kohlenstoffspeicherfähigkeit wiederhergestellt wird. Damit zeigen die Ergebnisse ein Potenzial auf, welches mit wirtschaftlichen Interessen und Fragen der Nahrungs- und Energiesicherheit zu verhandeln ist.

Die Bewertung von THG-Emissionen landwirtschaftlicher Flächen für die Lebensmittelproduktion wurde bereits durch die Ökobilanzierung vorgenommen. Entsprechend wird der Sektor Lebensmittel aus der ökonomischen Bewertung THG-Bedingter Umweltkosten durch Landnutzungsänderungen ausgeschlossen.

4 Folgenabschätzung einer Circular Economy in Deutschland

4.1 Ökologische Wirkungen

Die vorliegende MDCE-Studie hatte zum Ziel, das Einsparpotenzial in verschiedenen global betrachteten ökologischen Wirkungskategorien durch CE-Maßnahmen in ausgewählten Sektoren zu untersuchen. Diese Sektoren wurden so gewählt, dass sie einen Großteil der durch die deutsche Nachfrage erzeugten globalen ökologischen Wirkungen abdecken. Dies ist abzugrenzen von der globalen ökologischen Wirkung der deutschen Produktion, insbesondere im Hinblick auf den für die deutsche Volkswirtschaft wichtigen Export.

Zur Quantifizierung und Analyse der ökologischen Wirkung wurden die Ergebnisse von EE-MRIO-Modellierung, Ökobilanzierung und der FORECAST-Projektionen und die Ergebnisse der Analyse der Versorgungssicherheit zusammengeführt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die CE-Maßnahmen in den ausgewählten Sektoren der inländischen Nachfrage ein erhebliches Potenzial zur Einsparung in allen betrachteten ökologischen Wirkungskategorien aufweisen. Allerdings wird bereits im Baseline-Szenario von einer Verringerung von betrachteten Umweltbelastungen ausgegangen. Dabei wird angenommen, dass die heute beschlossenen oder in der Umsetzung weit fortgeschrittenen Umweltschutzmaßnahmen in den jeweiligen Sektoren bis 2045 umgesetzt sind.

4.1.1 Gesamtüberblick

4.1.1.1 Treibhausgasemissionen

Im Baseline-Szenario kommt es zu einem erheblichen Rückgang von 153 Mt CO_2-Äq gegenüber dem Status quo von 871 Mt CO_2-Äq. Dies ist vor allem auf eine Trendfortsetzung in den Sektoren Hochbau, Fahrzeuge, Beleuchtung und Lebensmittel zurückzuführen. Dabei machen die Sektoren Hochbau, Fahrzeuge und Lebensmittel im Status quo mit 740 Mt CO_2-Äq oder 85 % den überwiegenden Teil der Treibhausgasemissionen aus.

Der größte Rückgang im Baseline-Szenario im Vergleich zum Status quo ist auf den Bereich Fahrzeuge zurückführen. Hier gehen die Emissionen um ca. 77 Mt CO_2-Äq im Vergleich zum Status quo zurück, was v.a. mit der Reduktion des motorisierten Individualverkehrs sowie der vollständigen Elektrifizierung bei E-Autos begründet werden kann. Im Bereich Hochbau, wo im Baseline-Szenario knapp 53 Mt CO_2-Äq geringere Emissionen im Vergleich zum Status quo verursacht werden, wird davon ausgegangen, dass der Bau neuer Gebäude auf Grund des demographischen Wandels entsprechend der Gebäudebestandsentwicklung des Projektionsberichts rückläufig ist. Folglich ist nicht nur der mit der Nutzung der Gebäude verbundene Energieaufwand, sondern auch die Materialnachfrage für den Hochbau rückläufig. Somit sinken auch die mit der Materialproduktion verbundenen THG-Emissionen im Industriesektor. Die direkte Verknüpfung der Gebäudebestandsentwicklung mit dem Gebäudematerialbedarf im Industriesektor wurde im Rahmen des Projektionsberichts nicht berücksichtigt. Im Bereich Lebensmittel trägt der bereits heute beobachtete und fortgeführte Trend zur stärker pflanzenbasierten Ernährung mit einer Reduktion von 19 Mt CO_2-Äq zur Baseline bei. Bei Beleuchtung kommt es zu einer Verringerung von Treibhausgasemissionen von 22 Mt CO_2-Äq in der Baseline im Vergleich zum Status quo. Diese Reduktion ist v.a. auf den angenommenen Umstieg auf energieeffizientere LED-Lampen zurückzuführen. Hierdurch sinkt der Stromverbrauch, der im Beleuchtungssektor für einen Großteil der THG-Emissionen verantwortlich ist.

Die folgende Abbildung fasst die potenziellen **Treibhausgaseinsparungen der CE-Maßnahmen in den MDCE-Szenarien** zusammen. Demnach lassen sich im Mix-Szenario im Jahr 2045 durch die

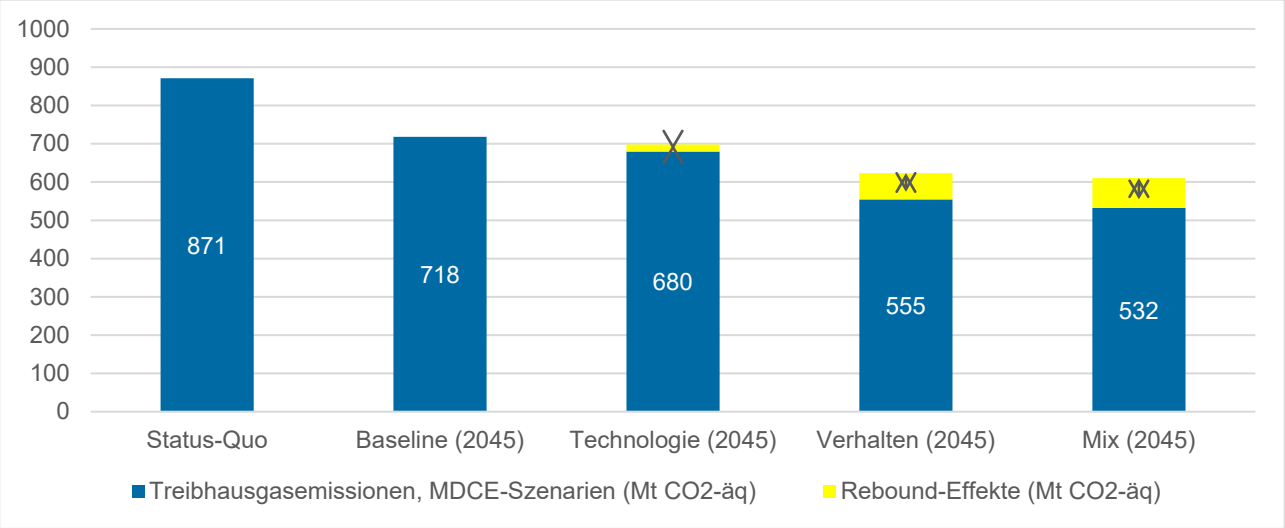
veränderte und verringerte Produktion in den analysierten Nachfragebereichen und ohne Berücksichtigung von Rebound-Effekten im Vergleich zum Baseline **186 Mt CO_2-Äq** einsparen, was **eine Verringerung von ca. 26 %** bedeutet.

Berücksichtigt man den Rebound-Effekt, in dem freiwerdendes verfügbares Einkommen auf Konsum in durch die Maßnahmen nicht regulierte Dienstleistungsbereiche verlagert wird, so verringern sich die Einsparungen auf 163 Mt CO_2-Äq im Mix-Szenario. Der Rebound-Effekt führt somit zu einem marginalen Rückgang der Einsparungen. Die ca. 4 % zusätzlichen Emissionen im Vergleich zu einer Betrachtung ohne Rebound durch freiwerdendes Einkommen Abbildung stellen allerdings eher eine untere Abschätzung oder ein bei entsprechendem Verhalten zu erreichendes Potenzial dar. Ähnlich gering fällt der Rebound bei Verausgabung des freiwerdenden Einkommens für zusätzliche Staatsausgaben aus, die ja ebenfalls einen hohen Dienstleistungsanteil ausweisen. Fließt das freiwerdende Einkommen hingegen beispielsweise in zusätzliche Investitionen, so kann der Rebound höher ausfallen und die Einsparungen im Vergleich zur Baseline verringern sich auf 108 Mt CO_2-Äq im Mix-Szenario.

Abbildung 4-1 zeigt auch, dass das Einsparpotenzial im Verhalten-Szenario ebenfalls besonders stark ausgeprägt ist. Dabei sinken die Treibhausgasemissionen um bis zu 144 Mt CO_2-Äq oder um bis zu 20 % (mit Rebound durch freiwerdendes Einkommen) im Vergleich zum Baseline-Szenario im Jahr 2045. Im Technologie-Szenario ist das Einsparpotenzial klein. Hier verringern sich die Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung des Rebound-Effektes nur um bis zu 33 Mt CO_2-Äq oder 5 % im Vergleich zum Baseline-Szenario. Auch im Verhalten- und Technologie-Szenario fallen die Einsparungen bei einer anderen Ausgabenstruktur für das freiwerdende Einkommen geringer aus.

Insgesamt kann der Abbildung entnommen werden, dass im Jahr 2045 knapp 718 Mt CO_2-Äq Treibhausgasmissionen emittiert werden, wenn die in dieser Studie modellierten CE-Maßnahmen nicht umgesetzt werden. Im Mix-Szenario würden die Emissionen im Jahr 2045 zwischen 555 Mt CO_2-Äq und 610 Mt CO_2-Äq liegen (unter Berücksichtigung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen). Im Verhalten-Szenario würden die Treibhausgasemissionen zwischen 574 Mt CO_2-Äq und 623 Mt CO_2-Äq und beim Technologie-Szenario zwischen 685 Mt CO_2-Äq und 698 Mt CO_2-Äq liegen.

Abbildung 4-1: Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) in MDCE-Szenarien

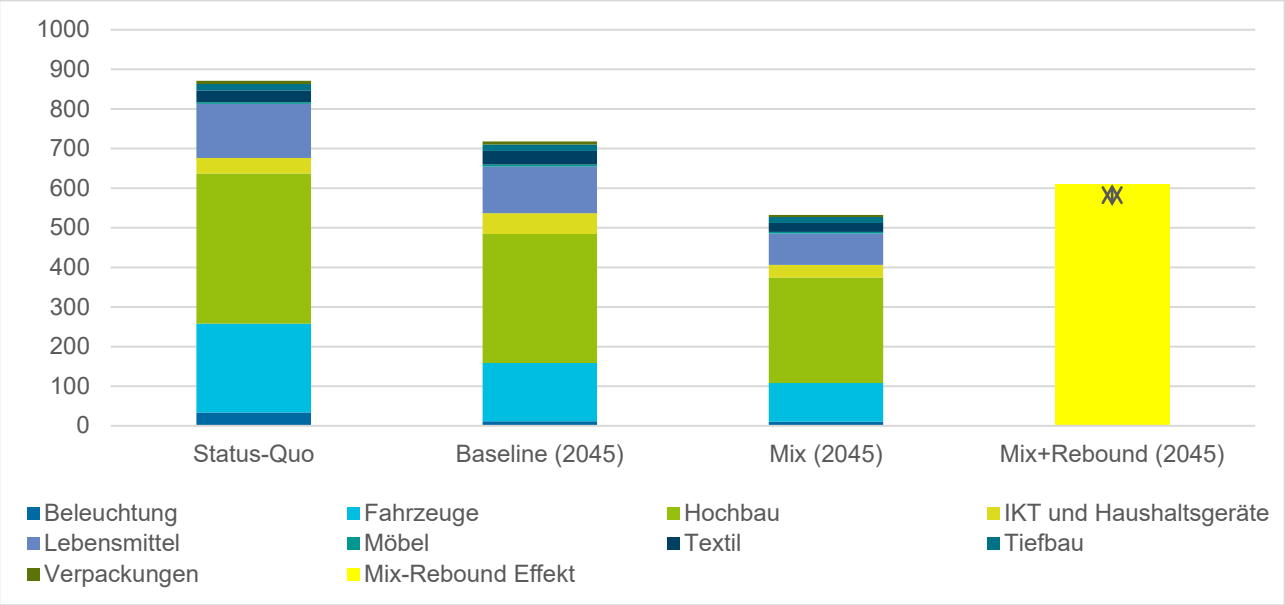


Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Einordnung des hohen Einsparpotenzials der CE-Maßnahmen, z.B. im Mix-Szenario, ist ein Vergleich mit dem Status quo sinnvoller als ein Vergleich mit dem Baseline-Szenario (Abbildung 4-2), denn im Baseline-Szenario wird davon ausgegangen, dass die von der Bundesregierung beschlossenen Umweltschutzmaßnahmen in den ausgewählten Sektoren bis 2045 umgesetzt sein werden. Aus diesem Grund werden im Baseline-Szenario (2045) im Vergleich zum Status quo (heute) geringere Treibhausgasemissionen verursacht. Vor dem Hintergrund großer Unsicherheiten im politischen Diskurs, z.B., wenn Prioritäten bei der Umsetzung von Maßnahmen neu definiert werden, könnte der hier gezeigte Entlastungseffekt von CE-Maßnahmen im Baseline-Szenario in geringerem Umfang auftreten als angenommen.

Im Vergleich zum Status quo führen die im Rahmen der Studie modellierten CE-Maßnahmen zu einem Rückgang zwischen 261 Mt CO_2-Äq und 317 Mt CO_2-Äq (unter Berücksichtigung des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen), was eine Einsparung zwischen 30 % und 36 % bedeutet.

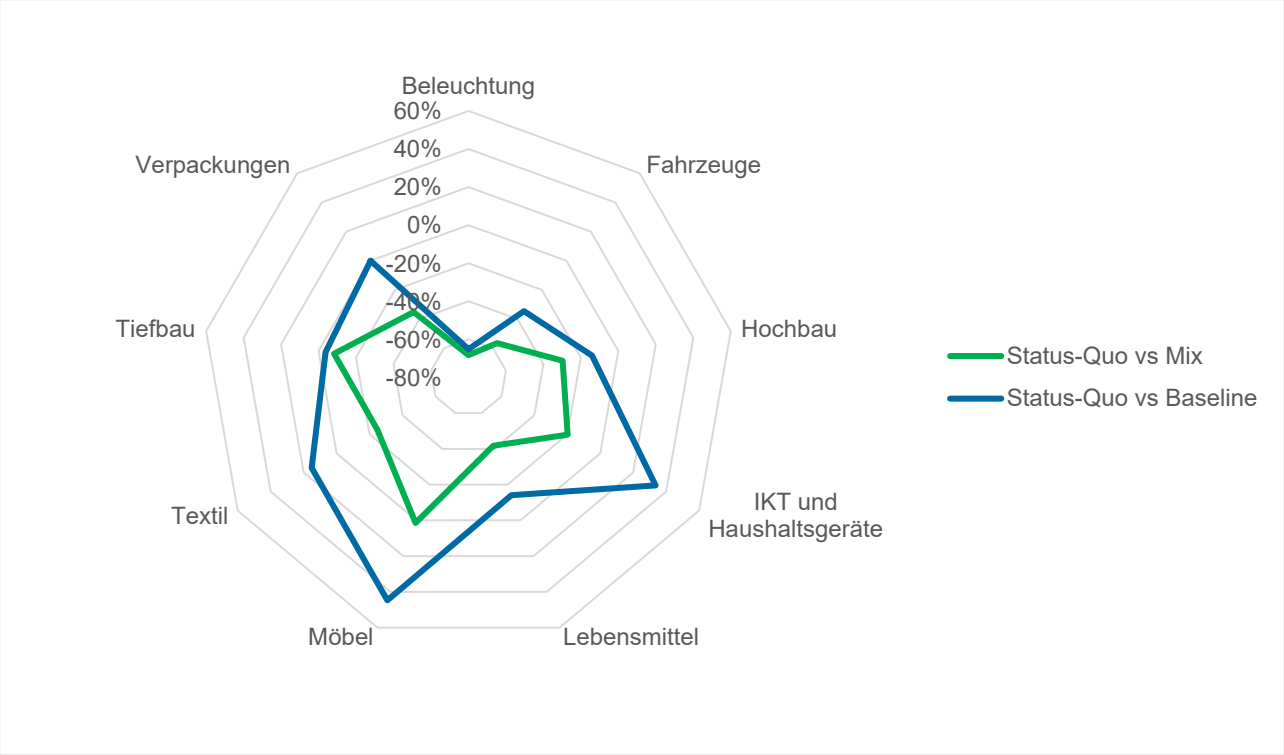
Abbildung 4-2: Vergleich Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) – Status quo, Baseline- und Mix-Szenario (ohne und mit Rebound durch freiwerdendes Einkommen)



Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-3 zeigt das Potenzial des Mix-Szenarios im Vergleich zum Status quo im Gegensatz zu den erwarteten Einsparungen im Baseline. Im Vergleich Status quo mit Baseline wird davon ausgegangen, dass die angenommenen Einspareffekte der bereits beschlossenen Maßnahmen tatsächlich eintreten. Der Einspareffekt der modellierten CE-Maßnahmen liegt dementsprechend zwischen den beiden Vergleichsszenarien – Status quo vs Baseline und Status quo vs Mix.

Abbildung 4-3: Veränderungen in den Treibhausgasemissionen (%) zwischen den MDCE-Szenarien



Quelle: Eigene Darstellung.

In der folgenden Tabelle 4-1 sind die Treibhausgasemissionen in den jeweiligen MDCE-Szenarien sektoral aufgeteilt.

Tabelle 4-1: Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) in den einzelnen Sektoren in den MDCE-Szenarien (inkl. Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen)

	Status quo	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Beleuchtung	34	12	12	11	11
Fahrzeuge	224	147	146	99	98
Hochbau	379	326	324	267	266
IKT und Haushaltsgeräte	40	53	35	39	32
Lebensmittel	137	117	104	88	79
Möbel	4	5	5	4	4
Textil	30	35	33	24	23
Tiefbau	16	16	15	16	15
Verpackungen	8	8	7	7	5

	Status quo	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Rebound min	0	0	5	20	23
Rebound max	0	0	18	69	78
Gesamt	**871**	**718**	**685-698**	**574-623**	**555-610**

Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Absolut gesehen liegen die höchsten Einsparpotenziale im Bereich Hochbau, sowohl im Mix- als auch im Verhalten-Szenario. Im Mix-Szenario verringern sich die Treibhausgasemissionen im Hochbau um 59 Mt CO_2-Äq im Vergleich zum Baseline. An zweiter Stelle kommen die Fahrzeuge: hier gehen die Treibhausgasemissionen durch die inländische Nachfrage nach Fahrzeugen und ihrer Nutzung im Mix-Szenario um 49 Mt CO_2-Äq zurück. Im Bereich Lebensmittel kommt es durch die Umsetzung der CE-Maßnahmen zu einem Rückgang von 38 Mt CO_2-Äq im Mix-Szenario. Danach folgen IKT-/Haushaltsgeräte und Textilien: in diesen Sektoren verringern sich die Treibhausgasemissionen um jeweils ca. 21 Mt CO_2-Äq und 12 Mt CO_2-Äq im Vergleich zum Baseline. In den verbleibenden Sektoren lassen sich insgesamt knapp 6 Mt CO_2-Äq durch die CE-Maßnahmen einsparen.

Tabelle 4-2: Einsparungen der Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) in den einzelnen Sektoren in den MDCE-Szenarien im Vergleich zur Baseline (2045), ohne Rebound-Effekte

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	0,1	-0,9	-1,0
Fahrzeuge	-1,3	-47,8	-49,3
Hochbau	-2,0	-58,6	-59,3
IKT und Haushaltsgeräte	-17,6	-13,5	-21,1
Lebensmittel	-13,7	-29,1	-37,9
Möbel	-0,6	-1,5	-1,6
Textil	-1,5	-10,5	-12,0
Tiefbau	-0,7	-0,2	-0,7
Verpackungen	-1,1	-1,1	-2,7
Gesamt	**-38,4**	**-163,3**	**-185,7**

Quelle: Eigene Darstellung.

Bezogen auf das Mix-Szenario lassen sich insgesamt allein in drei Sektoren, nämlich Hochbau, Fahrzeuge und Lebensmittel, knapp 79 % von Treibhausgasemissionen durch die modellierten CE-Maßnahmen einsparen. In den Bereichen IKT-/HH-Geräte und Textilien lassen sich weitere 18 % Treibhausgasemissionen durch die modellierten CE-Maßnahmen verringern.

Im Technologie-Szenario tragen v.a. die Sektoren IKT-/HH-Geräte und Lebensmittel maßgeblich zu den Einsparungen bei. Das Verhalten-Szenario ist in seiner Ausprägung in den meisten Fällen vergleichbar mit dem Mix-Szenario. In den beiden MDCE-Szenarien verlaufen die meisten Einspareffekte identisch, bis auf eine Ausnahme bei IKT-/HH-Geräten. Dort führt die ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren im Technologie-Szenario zu insgesamt höheren Einsparungen als im Verhalten-Szenario, wo die CE-Maßnahmen Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Geräten zwar stärker ausgeprägt sind, aber in dem Gesamteffekt unter dem Entlastungspotenzial im Bereich Rechenzentren liegen. Bei IKT-/HH-Geräten tragen auch CE-Maßnahmen in den Bereichen Remanufacturing und Recycling zum positiven Effekt im Technologie-Szenario bei.

Im Bereich Tiefbau ergeben sich im Technologie-Szenario ebenfalls leicht höhere Einsparungen als im Verhalten-Szenario. Im Beleuchtungssektor würden die Treibhausgasemissionen im Technologie-Szenario im Vergleich zum Baseline sogar leicht ansteigen.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass das Verhalten-Szenario ein stärkeres Entlastungspotenzial bei Treibhausgasemissionen hat als das Technologie-Szenario. Durch die Kombination von den genannten beiden Szenarien, im Technologie- sowie im Verhaltensbereich, lassen sich höhere Treibhausgasemissionseinsparungen realisieren (im Mix-Szenario).

Tabelle 4-3 zeigt zusätzlich die prozentualen Veränderungen der Treibhausgasemissionen in den jeweiligen MDCE-Szenarien im Vergleich zum Baseline im Jahr 2045.

Tabelle 4-3: Veränderungen der Treibhausgasemissionen (%) in den einzelnen Sektoren in den MDCE-Szenarien im Vergleich zum Baseline (2045), ohne Rebound-Effekte

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	1 %	-8 %	-9 %
Fahrzeuge	-1 %	-33 %	-34 %
Hochbau	-1 %	-18 %	-18 %
IKT und Haushaltsgeräte	-33 %	-26 %	-40 %
Lebensmittel	-12 %	-25 %	-32 %
Möbel	-12 %	-27 %	-30 %
Textil	-4 %	-30 %	-35 %
Tiefbau	-5 %	-2 %	-5 %
Verpackungen	-14 %	-14 %	-35 %

Quelle: Eigene Darstellung.

Die stärksten prozentualen Veränderungen bei den Treibhausgasemissionen ergeben sich bei IKT- und HH-Geräten mit 40 % zwischen Baseline- und Mix-Szenario. In den anderen Sektoren, wo die konsumseitigen Veränderungen stark ausgeprägt sind, zeigen sich hohe prozentuale Veränderungen zwischen 30 % und 35 % im Mix-Szenario. Das betrifft Verpackungen, Textilien, Fahrzeuge, Lebensmittel und Möbel. Im Bereich Hochbau sind die Veränderungen v.a. auf die Reduzierung der Wohn- und Büroraumanspruchnahme zurückzuführen, was zwar absolut gehen die höchsten Einsparpotenziale vorweist, aber nur um eine 18 %ige Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Baseline führt. In den Bereichen Tiefbau und Beleuchtung sind nur wenige Veränderungen im einstelligen Prozentbereich zu verzeichnen, da hier entweder die Potenziale an sich begrenzt sind (Tiefbau) oder die in der Produktpolitik beschlossenen und im Zuge der Marktentwicklung erwarteten Innovationen nur wenige, weitere Entlastungseffekte hervorrufen (Beleuchtung).

Exkurs Satellitenanalyse Industrietransformation

Auf die Industrie entfällt heute etwa rund ein Viertel des Endenergiebedarfs in Deutschland, was vor allem auf energieintensive Schlüsselindustrien, Produkte und Prozesse wie die Stahl-, Zement- und Ethylen-Produktion zurückzuführen ist. Die Dekarbonisierung dieser Industrien ist daher entscheidend für die Erreichung der europäischen und deutschen Klimaziele. Eine materialeffiziente Kreislaufwirtschaft (Circular Economy, CE) für die CO_2-intensivsten Materialien kann einen wesentlichen Beitrag zum Ziel einer CO_2-neutralen Wirtschaft leisten. Da das Konzept der Circular Economy (CE) in der europäischen politischen Debatte an Dynamik gewinnt – angetrieben durch die Sorge um die

Nachhaltigkeit und die Verringerung von Versorgungsrisiken für zukunftsrelevante Technologien – bestehen Synergien zwischen Energie-, Kreislaufwirtschafts- und Industriepolitik. CE kann die Materialeffizienz von Produkten erhöhen, wodurch der Rohstoffbedarf gesenkt werden kann. Darüber hinaus kann CE die Endnachfrage nach Energie reduzieren und damit die Kosten für den Ausbau erneuerbarer Energien, das Netz und den Import von Sekundärenergieträgern senken. Folglich müssen die stoffliche Nutzung und ihre Verbindung zum Energiesystem berücksichtigt werden, wenn die Grundsätze der CE in die politische Entscheidungsfindung, die Energie-Material-Modellierung und die Analyse ehrgeiziger Treibhausgasminderungspfade einbezogen werden.

Die nachfolgenden Ergebnisse der Satellitenanalyse zur Industrietransformation zeigen eine Analyse der direkten Effekte der betrachteten CE-Maßnahmen auf den deutschen Industriesektor. Fokus der Betrachtung liegt dabei auf den energie-intensiven Grundstoffen Stahl, Zement, Ethylen, Glass, Papier, Aluminium und ausgewählten Prozesse der Ernährungsindustrie. Im Folgenden werden sechs Szenarien für den Industriesektor mit dem Bezugszeitpunkt 2045 betrachtet (Baseline, Technologie, Verhalten, Mix, DekarbBaseline, DekarbMix). Vier dieser Szenarien sind keine Dekarbonisierungsszenarien (Baseline, Technologie, Verhalten, Mix), das bedeutet, sie nehmen nicht an, dass die deutsche Industrie im Jahr 2045 nahezu klimaneutral ist. Das Baseline-Szenario wurde auf der Grundlage des Projektionsberichts zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Jahre 2021 bis 2040 (Repenning et al. 2021; Fleiter und Rehfeldt 2022) weiterentwickelt und berücksichtigt den Ende August 2020 beschlossenen Instrumentenmix für den Industriesektor und das Klimaschutz-Sofortprogramm 2022 (Förderbudgets für dekarbonisierte Produktionsverfahren). Die Szenarien Technologie, Verhalten und Mix ergänzen dieses Szenario um die relevanten direkten Effekte der MDCE-Szenarien (siehe Abschnitt 3.1). Die Transformationsszenarien DekarbBaseline und DekarbMix streben eine Emissionsminderung von mindestens 95 % bis zum Jahr 2045 gegenüber 1990 an und basieren jeweils auf dem Baseline- und Mix-Szenario. Die beiden Szenarien berücksichtigen alle wichtigen Emissions-Vermeidungshebel:

- Steigerung der Energieeffizienz durch beste verfügbare Technik;
- Brennstoffwechsel hin zu sekundären Energieträgern (Strom, Wasserstoff) und Biomasse;
- CCU/S: Zement und Kalk als CO_2-Quelle;
- CO_2-arme Verfahren: H_2-DRI (direkt reduziertes Eisen, engl. iron) in der Stahlindustrie, H_2-Elektrolyse Ammoniak und Methanol sowie MtO (Methanol-to-Olefins) in der Grundstoffchemie, und CO_2-armer Zement.

In allen MDCE-Szenarien wird bis 2045 eine Minderung der Treibhausgasemissionen der Industrie um 48 bis 97 % gegenüber 1990 erreicht (siehe Tabelle 4-4). Die Entwicklung der energiebedingten Emissionen folgt dabei dem nachfolgend diskutieren Energieverbrauch (siehe Abbildung 4-4) und wird für das Jahr 2045 in den Szenarien ohne "*Ziel Klimaneutralität*" vom Erdgasbedarf der Industrie dominiert (siehe Tabelle 4-4). Bereits im Baseline-Szenario kommt es durch die Umsetzung des beschlossenen Instrumentenmix zu einer substanziellen Emissionsreduktion ggü. 2018 von rund 48 % (-89 Mt CO_2-Äq), dies entspricht einer Emissionsminderung von 65 % gegenüber 1990.

In den MDCE-Szenarien leistet das Mix-Szenario gefolgt vom Verhalten-Szenario und dem Technologie-Szenario weitere Minderungsbeitrage von minus 75 % gegenüber 1990. **Das entspricht einer zusätzlichen Emissionseinsparung von rund 10 % ggü. 1990 im Mix-Szenario – das sind rund minus 26 Mt CO_2-Äq gegenüber der Baseline im Jahr 2045.** Hervorzuheben ist hier auch der Beitrag der MDCE-Szenarien zur Reduktion von schwer vermeidbaren Emissionen, d.h. Prozessemissionen, welche durch chemische Reaktionen im Produktionsprozess entstehen. Hier kommt es zu einer zusätzlichen Minderung in den MDCE-Szenarien gegenüber der Baseline von minus 6 Mt CO_2-Äq (Technologie-Szenario) bis zu minus 11 Mt CO_2-Äq in 2045 (Mix-Szenario). Dies stellt einen wichtigen Beitrag auf dem Weg zu Erreichung der Klimaziele dar, denn Prozessemissionen

sind schwer zu vermeiden und benötigen erhebliche Veränderungen im Produktionsprozess, die Entwicklung neuer Produkte oder den Einsatz von CCU/S. Insbesondere Prozessemissionen aus kleineren Punktquellen (z.B. der Glas- und Keramikindustrie) sind aufgrund hoher Vermeidungskosten eine Herausforderung für die Industrietransformation.

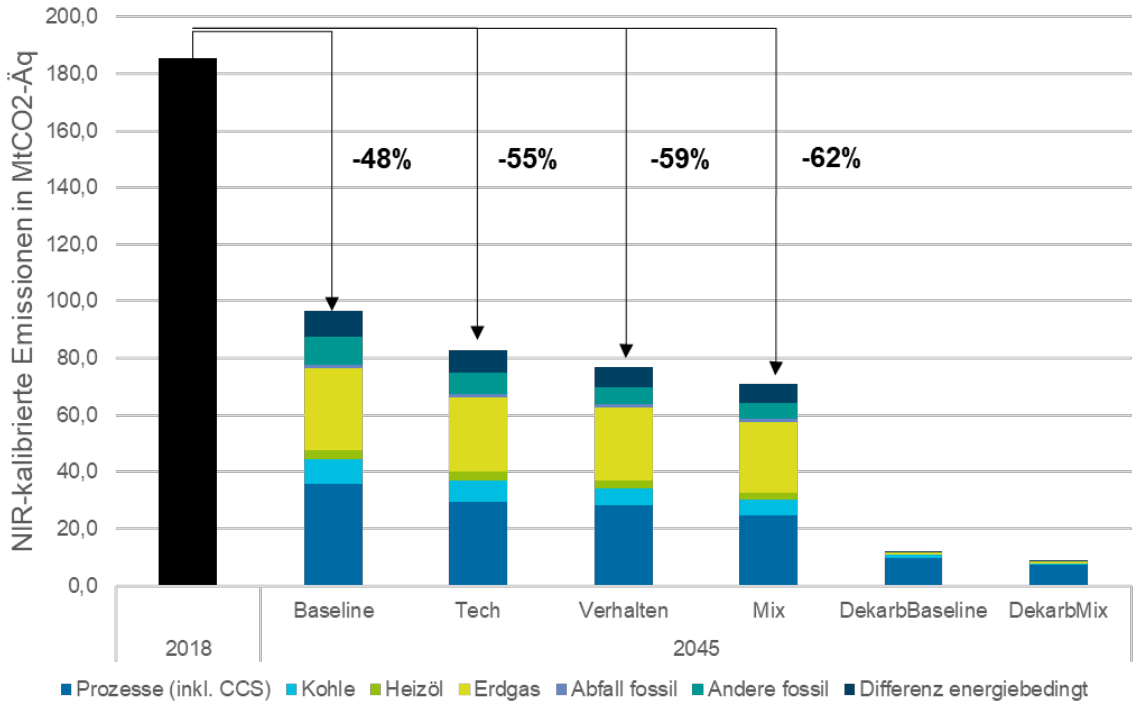
In den Transformationsszenarien werden per Definition Emissionsreduktionen von über 95 % erzielt (96 % in DekarbBaseline und 97 % in DekarbMix). Auch hier verdienen die Prozessemissionen besondere Erwähnung, denn im DekarbMix-Szenario werden die verbleibenden Prozessemissionen um mehr als ein Viertel im Vergleich zu DekarbBaseline gesenkt (von rund 10 Mt CO_2-Äq auf rund 7 Mt CO_2-Äq).

Tabelle 4-4: NIR kalibrierte Emissionen Industriesektor (Mt CO_2-Äq) nach Szenario und Quelle

Emissionen (NIR kalibriert)	1990	2018	Baseline	Tech	Verhalten	Mix	Dekarb Baseline	Dekarb Mix
Prozesse (inkl. CCS)		60,5	35,7	29,5	28,1	24,8	9,76	7,3
Kohle		34,3	8,6	7,6	6,0	5,3	1,0	0,4
Heizöl		3,9	3,5	2,8	2,7	2,6	0,3	0,2
Erdgas		43,5	28,7	26,3	25,7	24,9	0,7	0,7
Abfall fossil		3,5	1,3	1,1	1,1	1,0	0,0	0,0
Andere fossil		21,7	9,8	7,6	6,0	5,5	0,1	0,1
Differenz energiebedingt		18,2	8,8	7,7	7,1	6,7	0,3	0,2
SUMME	**279,3**	**185,6**	**96,5**	**82,6**	**76,8**	**70,8**	**12,2**	**8,9**
Minderung ggü. 1990		*-34 %*	*-65 %*	*-70 %*	*-73 %*	*-75 %*	*-96 %*	*-97 %*
Veränderung ggü. Baseline in 2045				*-14 %*	*-20 %*	*-27 %*	*-87 %*	*-91 %*
Minderung ggü. 2018			*-48 %*	*-55 %*	*-59 %*	*-62 %*	*-93 %*	*-95 %*

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-4: Entwicklung Emissionen nach Szenario in Mt CO_2-Äq (2018, 2045, NIR-kalibriert)



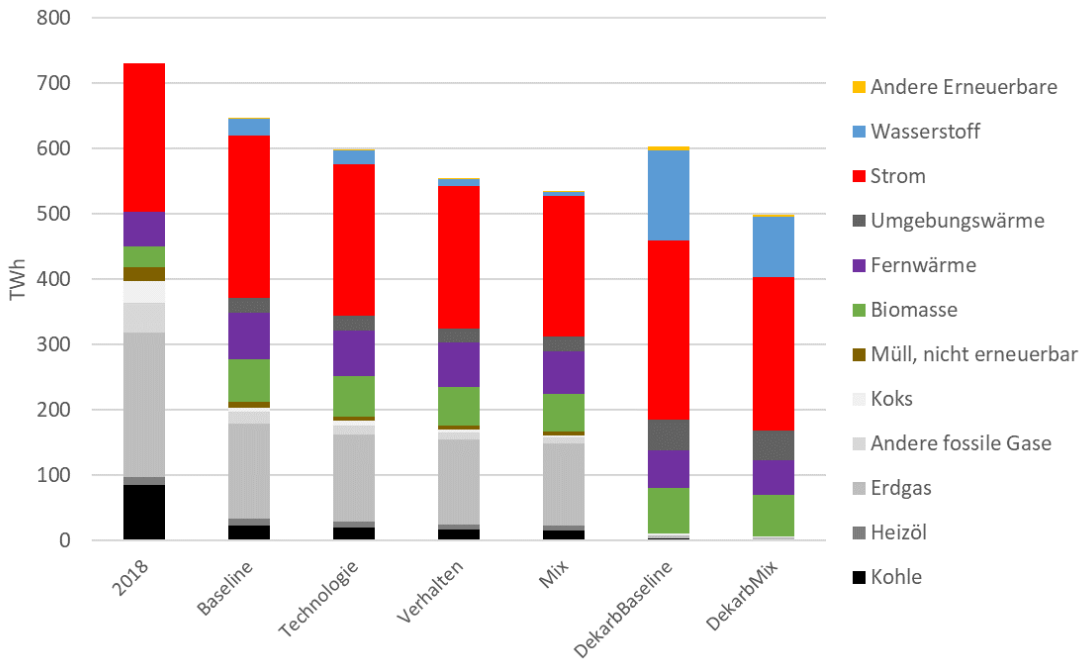
Quelle: Eigene Darstellung.

Die Endenergienachfrage (EEV) aller Szenarien ist in Abbildung 4-5 dargestellt. **In allen Szenarien ist ein deutlicher Rückgang der Energienachfrage (abhängig vom Szenario zwischen 11 und 32 % im Jahr 2045 gegenüber 2018) zu beobachten**. Dieser Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass Maßnahmen zur Energieeffizienz sowie die Umsetzung einer Circular Economy den Wachstumsimpuls der Industriewertschöpfung überkompensieren. Hinzukommen – je nach Szenario – zusätzliche Effekte, wie etwa Effizienzgewinne durch die Elektrifizierung von Prozessen oder die Verschiebung der Wasserstoffproduktion in den Umwandlungssektor. Wird Wasserstoff CO_2-neutral über Elektrolyse erzeugt, ergibt sich ein potenziell sehr hoher Strombedarf, wenngleich dieser außerhalb der genutzten Systemgrenze des Industriesektors im Umwandlungssektor liegt.

In den Szenarien Technologie, Verhalten und Mix kommt es im Vergleich zum Baseline-Szenario im Jahr 2045 zu einer zusätzlichen Einsparung von minus 50 TWh (-8 %) bis minus 112 TWh (-17 %) des Endenergieverbrauchs abhängig vom betrachteten Szenario. Die größte Einsparung wird dabei im Mix-Szenario erreicht, einem Szenario in dem sowohl Verhaltensänderungen hin zu weniger Konsum – und folglich auch Produktion – als auch Prozesswechsel zu weniger energie-intensiver Sekundärproduktion stattfindet. Während sich in den vier Szenarien ohne "*Ziel Klimaneutralität*" der Energieträgermix kaum verändert, so ist im DekarbBaseline-Szenario Strom mit rund 275 TWh (46 %) der dominante Energieträger, gefolgt von Wasserstoff mit 138 TWh (23 %). Die restliche Endenergienachfrage verteilt sich auf Biomasse, Fernwärme, Umgebungswärme und andere Erneuerbare. Wasserstoff wird im DekarbBaseline-Szenario in der Stahlindustrie und für einen Teil der Hochtemperaturprozesswärme eingesetzt (z.B. in der Glasindustrie und einen Teil der Klinkerproduktion). Für den Bereich der weiteren Industrieöfen, Dampferzeugung und Niedertemperaturwärme (< 150°C) ist der Energiemix vielfältiger. Zusätzlich werden im DekarbBaseline-Szenario rund 287 TWh Wasserstoff als Feedstock in der chemischen Grundstoffindustrie eingesetzt.

Des Weiteren tragen die MDCE-Szenarien zu einer relevanten Senkung des Energiebedarfs, zwischen den Szenarien bei (siehe Abbildung 4-5). Insbesondere in MDCE-Transformationsszenarien kann eine Reduktion der Nachfrage nach teuren Energieträgern wie Strom und Wasserstoff die Kosten der Transformation senken.

Abbildung 4-5: Entwicklung Endenergienachfrage nach Szenario in TWh (2018, 2045)



Quelle: Eigene Darstellung.

Vergleicht man nun das DekarbMix-Szenario mit DekarbBaseline lässt sich ein klarer Rückgang des Endenergieverbrauchs von 104 TWh (-17 %) im Jahr 2045 erkennen, davon entfallen rund 45 TWh Reduktion auf Wasserstoff und rund 39 TWh Reduktion auf Strom. Weiterhin werden im DekarbMix-Szenario rund 8 % des Wasserstoffbedarfs für die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie eingespart, die entspricht weiteren 23 TWh Wasserstoff. Somit spart das DekarbMix-Szenario im Vergleich zur DekarbBaseline rund 68 TWh Wasserstoff und 39 TWh Strom im Jahr 2045. Daraus lässt sich schließen, dass eine Circular Economy durchaus einen Beitrag zum Ziel einer CO_2-neutralen und wettbewerbsfähigen Wirtschaft leisten kann, denn ein niedrigerer Verbrauch an sekundären Energieträgern (z.B. Strom und Wasserstoff) kann kurzfristig Knappheiten entschärfen und langfristig die Kosten für den Ausbau von Erneuerbaren Energien, den Netzausbau und den Import von Sekundärenergieträgern senken.

Zu den hier gezeigten Ergebnissen muss gesagt werden, dass es sich hierbei um keine Prognosen, sondern um konsistente Wenn-Dann-Aussagen eines Modelles handelt, welches per Definition eine Vereinfachung und somit Abstrahierung der Wirklichkeit darstellt. Des Weiteren wurde in dieser Analyse nur der Industriesektor betrachtet.

4.1.1.2 Ressourceninanspruchnahme

Für den Indikator Rohstoffkonsum (RMC) zeigt der Vergleich der auf bereits beschlossenen oder fortgeschrittenen Maßnahmen beruhenden Baseline mit dem Status quo Einsparungen von 22 %. Dies ist insbesondere auf Trends aus den Bereichen Hochbau, Fahrzeuge, Beleuchtung und Lebensmittel zurückzuführen. Die Sektoren Hochbau, Fahrzeuge und Nahrungsmittel machen mit

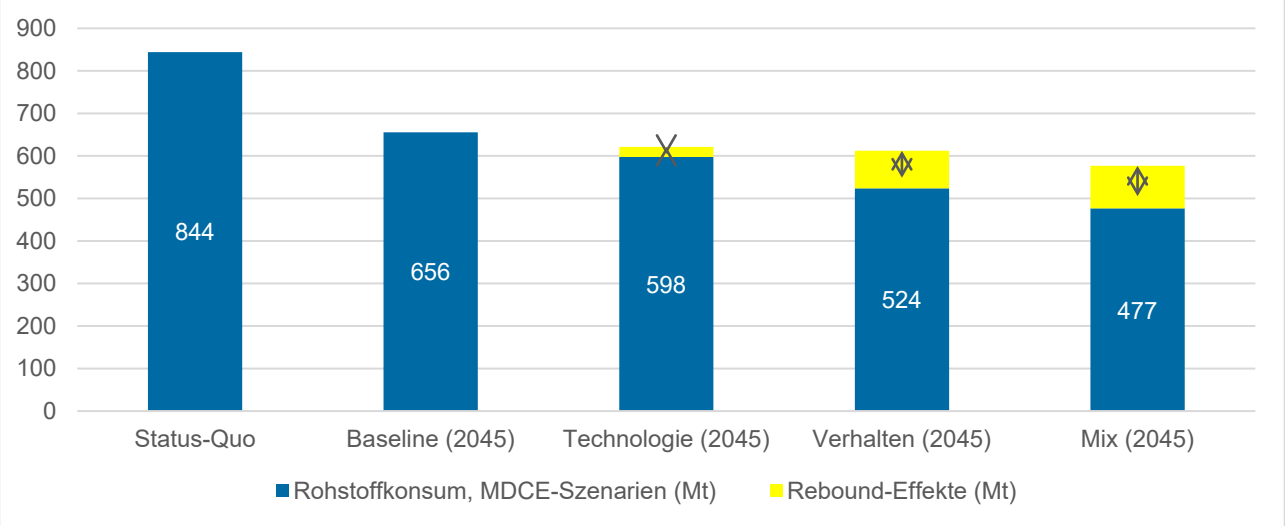
79 % oder 669 Mt den größten Teil des Rohstoffkonsums im Status quo aus. Auch durch die signifikanten Einsparungen schon in der Baseline ändert sich dieses Verhältnis nur geringfügig. Hochbau, Lebensmittel und Fahrzeuge bleiben mit Abstand die größten Sektoren und machen in der Baseline noch 73 % des Rohstoffkonsums aus (Abbildung Abbildung 4-7).

Der größte Rückgang im Baseline-Szenario im Vergleich zum Status quo ist auf den Hochbau zurückzuführen. Hier sinkt der Rohstoffverbrauch um ca. -153 Mt gegenüber dem Status quo, was vor allem auf den angenommenen Rückgang neuer Wohn- und Büroflächen zurückzuführen ist. Im Fahrzeugsektor sinkt der Rohstoffkonsum gegenüber dem Status quo um ca. 27 Mt.. Im Bereich der Lebensmittel trägt der bereits heute zu beobachtende und sich fortsetzende Trend zu einer stärker pflanzenbasierten Ernährung mit einer Reduktion von 10 Mt zur Baseline bei. Für den Sektor Beleuchtung ergibt sich in der Baseline im Vergleich zum Status quo eine Minderung des RMC um 14 Mt. Diese Reduktion ist vor allem auf die angenommene Umstellung auf energieeffizientere LED-Lampen zurückzuführen. Dadurch sinkt der Stromverbrauch, der im Beleuchtungssektor für einen Großteil des RMC verantwortlich ist. Durch die modellierte Anpassung des Strommix mit einem deutlich reduzierten Anteil ressourcenintensiver fossiler Energieträger wird dieser Anteil weiter reduziert.

Dementgegen kommt es bei IKT- und HH-Geräten, Textilien und Möbel zu einem Anstieg des Rohstoffkonsums zwischen Status quo und Baseline. Vor allem ist der Anstieg bei IKT- und HH-Geräten mit 9 Mt stärker ausgeprägt als bei Textilien und Möbeln, wo der Rohstoffkonsum um 5 Mt bzw. 3 zunimmt. In der Gesamtübersicht sind dies jedoch auf den Rohstoffkonsum bezogen kleinere Sektoren.

Die folgende Abbildung 4-6 fasst den potenziellen **Ressourcenkonsum (RMC) der CE-Maßnahmen in den MDCE-Szenarien** zusammen. Demnach können im Mix-Szenario im Jahr 2045 ohne Berücksichtigung des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen 179 Mt Rohstoffe im Vergleich zur Baseline eingespart werden, was einer Reduktion von ca. 27 % entspricht. Wird der Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen berücksichtigt, in diesem Fall der Shift des freiwerdenden verfügbaren Einkommens auf nicht durch die CE-Maßnahmen regulierte Konsumbereiche, reduziert sich die Einsparung im Mix-Szenario auf -150 Mt. Der Rebound-Effekt führt also zu einer Verringerung der Einsparungen und wirkt sich mit ca. 29 Mt aus. Dies ist als untere Abschätzung anzusehen. Wird das freiwerdende Einkommen für ressourcenintensivere Produkte ausgegeben, etwa durch eine höhere Nachfrage nach Investitionen so verringern sich die Einsparungen um bis zu 100 Mt und liegen nur noch bei 79 Mt.

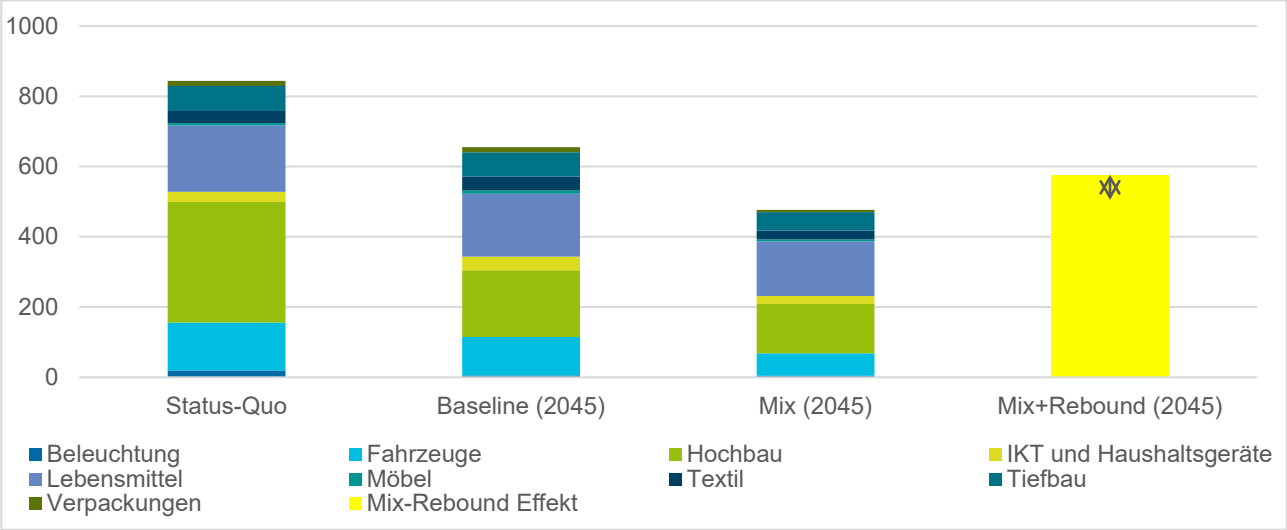
Abbildung 4-6: Rohstoffkonsum, RMC (Mt) in MDCE-Szenarien



Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

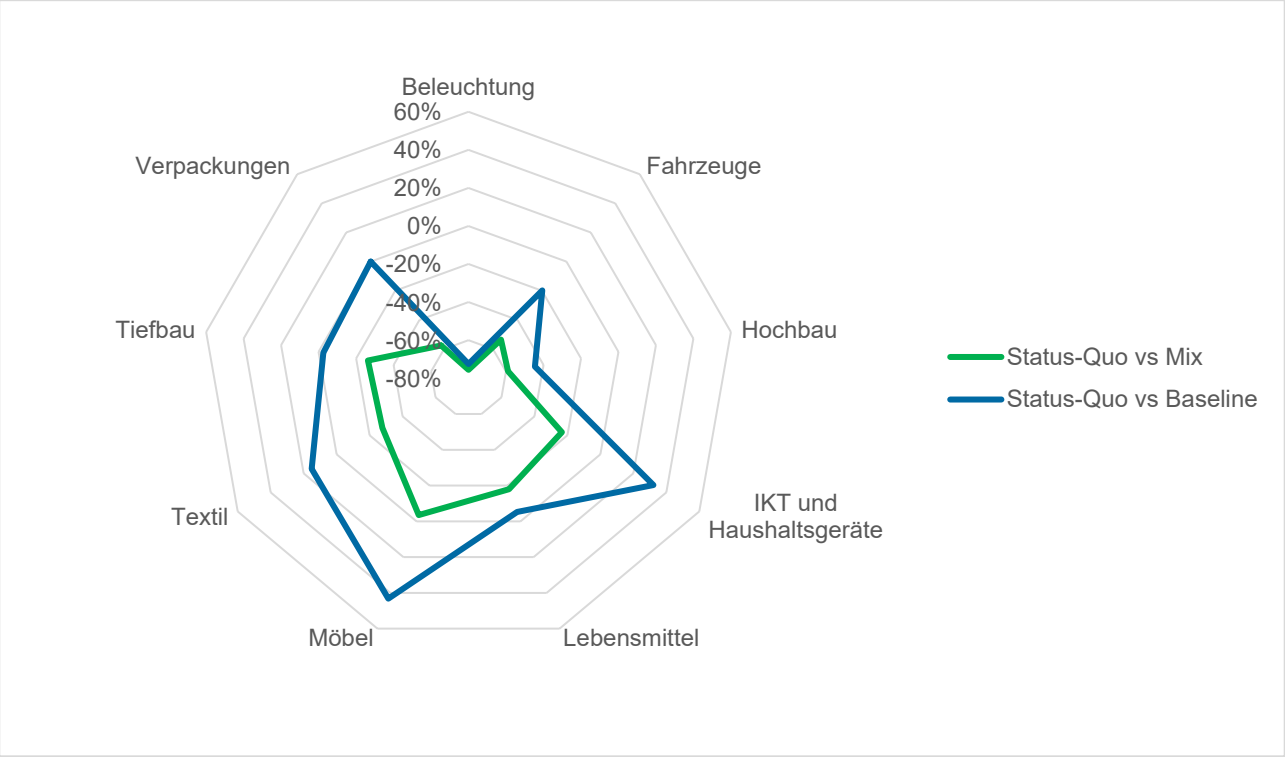
Durch die CE-Maßnahmen lässt sich der Rohstoffkonsum in den Szenarien Technologie, Verhalten und Mix ohne Berücksichtigung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen auf 598 Mt, 524 Mt bzw. 477 Mt senken (Abbildung 4-6). Gegenüber der Baseline entspricht dies Rückgängen von 9 %, 20 % und 27 %. Der Rebound wird je nachdem wofür das freiwerdende Einkommen ausgegeben wird auf 7-24 Mt für das Technologie-Szenario, 25-88 Mt für das Verhalten-Szenario und 29-100 Mt für das Mix-Szenario geschätzt. Der Rohstoffkonsum liegt damit bei 604-621 Mt, 549-612 Mt und 505-577 Mt Gegenüber der Baseline kommt das ambitionierte Mix-Szenario daher unter Einbezug des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen noch auf eine Reduktion des Rohstoffkonsums von 12-23 % oder 79-151 Mt. Die Reduktion durch die CE-Maßnahmen ist in jedem Fall signifikant, hängt aber maßgeblich von der Ausprägung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen ab.

Abbildung 4-7: Rohstoffkonsum, RMC (Mt) – Mix-Szenario (2045)



Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-8: Rohstoffkonsum, RMC – Veränderungen (%)



Quelle: Eigene Darstellung.

In der folgenden Tabelle 4-5 ist der Rohstoffkonsum in den jeweiligen MDCE-Szenarien sektoral aufgeteilt.

Tabelle 4-5: Rohstoffkonsum RMC (Mt) in MDCE-Szenarien

	Status quo	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Beleuchtung	20	5	5	5	5
Fahrzeuge	136	109	107	66	63
Hochbau	343	190	178	148	141
IKT und Haus-haltsgeräte	29	39	26	28	22
Lebensmittel	189	179	172	162	155
Möbel	6	9	8	6	6
Textil	35	40	37	28	25
Tiefbau	71	69	52	69	52
Verpackungen	15	15	12	12	6
Rebound min	0	0	7	25	29
Rebound max	0	0	24	88	100
Gesamt	**844**	**656**	**604-621**	**549-612**	**505-577**

Quelle: Eigene Darstellung.

Absolut gesehen liegen die höchsten Einsparpotenziale auf Grund der Größe des gesamten Rohstoffkonsums im Bereich Hochbau und Fahrzeuge, sowohl im Mix- als auch im Verhalten-Szenario.

Im Mix-Szenario verringert sich der Rohstoffkonsum im Hochbau um 49 Mt (-26 %) im Vergleich zu der Baseline. An zweiter Stelle kommen die Fahrzeuge mit einer Reduktion im Mix-Szenario um 46 Mt (-42 %). Im Bereich Lebensmittel kommt es durch die Umsetzung der CE-Maßnahmen zu einem Rückgang von 24 Mt (13 %) im Mix-Szenario. Danach folgen zwischen Baseline- und Mix-Szenario Einsparungen beim Tiefbau (-17 Mt, -24 %)), IKT-/ Haushaltsgeräte (-16 Mt, -42 %) und Textilien (-15 Mt, -37 %). In den verbleibenden Sektoren lassen sich insgesamt knapp 12 Mt durch die CE-Maßnahmen einsparen.

Im Mix-Szenario können somit allein in den drei Sektoren Hochbau, Fahrzeuge und Lebensmittel insgesamt zwei Drittel des Einsparpotenzials beim Rohstoffkonsum durch die modellierten CE-Maßnahmen realisiert werden. In den Bereichen IKT/Haushaltsgeräte, Textilien und Tiefbau sind es zusammen weitere 27 %.

Tabelle 4-6: Rohstoffkonsum RMC in MDCE-Szenarien – Einsparungen (Mt)

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	-0,1	-0,5	-0,6
Fahrzeuge	-2,6	-43,1	-46,1
Hochbau	-12,0	-42,5	-49,2
IKT und Haushaltsgeräte	-12,6	-10,7	-16,3
Lebensmittel	-7,2	-17,2	-23,9
Möbel	-1,1	-2,6	-2,9
Textil	-2,7	-12,2	-14,9
Tiefbau	-16,9	-0,6	-16,9
Verpackungen	-2,6	-2,5	-8,4

Quelle: Eigene Darstellung.

Im Technologie-Szenario tragen vor allem die Sektoren Tiefbau (-17 Mt, -24 %), IKT und Haushaltsgeräte (-13 Mt, -33 %) sowie der Hochbau (-12 Mt, -6 %) zu den Einsparungen bei. Im Gegensatz zum Hochbau ist der Tiefbau nicht von der Reduktion der Wohn- und Büroflächen in der Baseline betroffen, so dass hier ein insgesamt höheres Potenzial durch die technologische Maßnahme des Zementrecyclings besteht. Die Einsparungen des Technologie-Szenarios liegen hier über denen des Verhalten-Szenarios. Insgesamt sind die Einsparungen des Technologie-Szenarios jedoch mit 35-52 Mt jedoch deutlich geringer als im Verhalten-Szenario mit 44-107 Mt und logischerweise am höchsten im aus beiden Arten von Maßnahmen zusammengesetzten ambitionierten Mix-Szenario mit 79-151 Mt.

Die Tabelle 45 zeigt die zusätzlich die prozentualen Veränderungen des Rohstoffkonsums in den jeweiligen MDCE-Szenarien im Vergleich zu der Baseline im Jahr 2045.

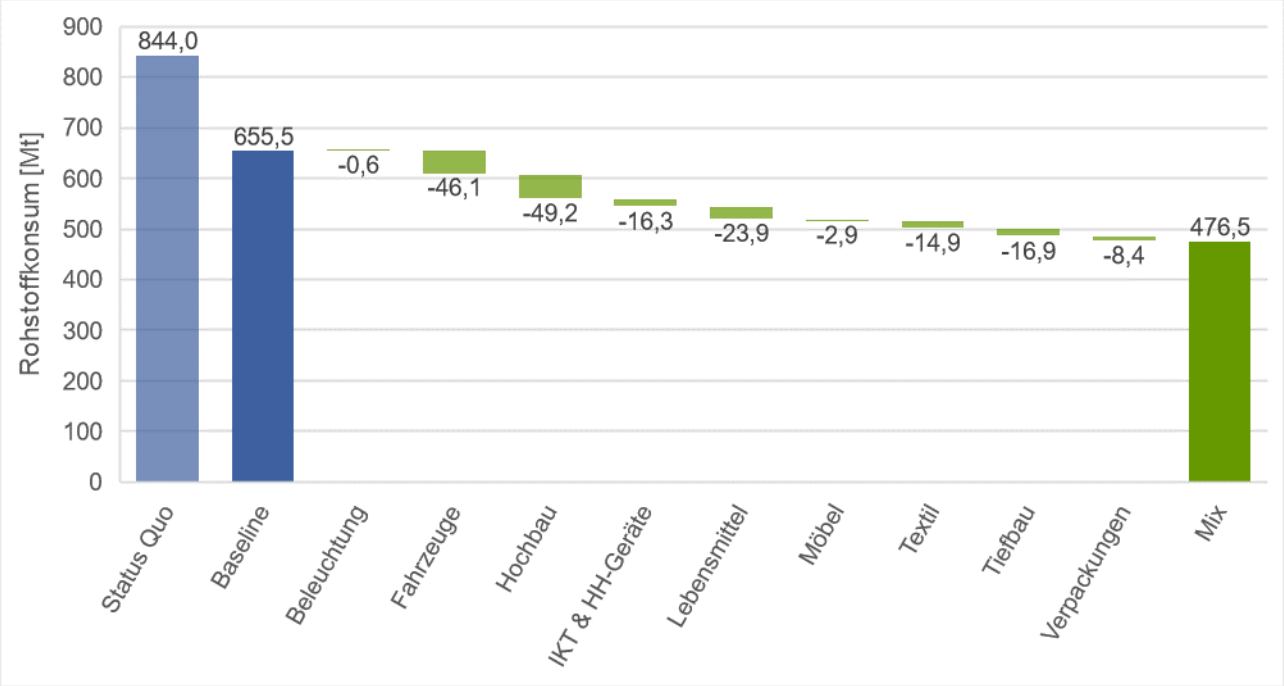
Tabelle 4-7: Rohstoffkonsum RMC in MDCE-Szenarien – Veränderungen (%)

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	-1 %	-9 %	-11 %
Fahrzeuge	-2 %	-39 %	-42 %
Hochbau	-6 %	-22 %	-26 %
IKT und Haushaltsgeräte	-33 %	-28 %	-42 %
Lebensmittel	-4 %	-10 %	-13 %

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Möbel	-12 %	-30 %	-33 %
Textil	-7 %	-30 %	-37 %
Tiefbau	-24 %	-1 %	-24 %
Verpackungen	-18 %	-17 %	-58 %

Quelle: Eigene Darstellung.

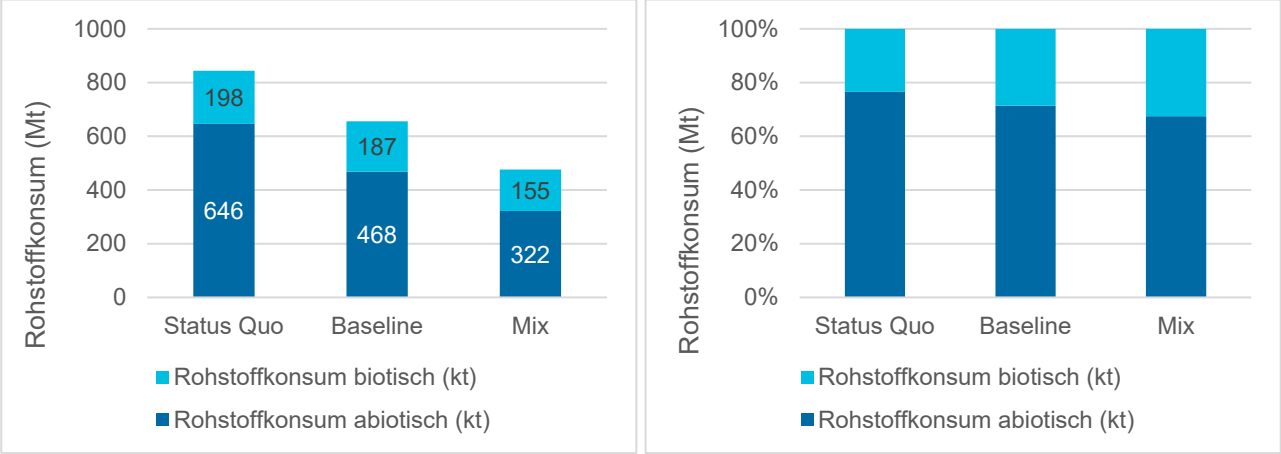
Abbildung 4-9: Rohstoffkonsum, RMC – Gesamtübersicht



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Status quo beträgt der Rohstoffkonsum insgesamt 844 Mt, davon 77 % abiotische und 23 % biotische Rohstoffe. Der Rohstoffkonsum sinkt im Baseline-Szenario auf insgesamt 655 Mt, wobei 71 % auf abiotische und 29 % auf biotische Rohstoffe entfallen. Die Einsparungen erfolgen vor allem im Bereich der abiotischen Rohstoffe mit einem Rückgang von 178 Mt, wobei 84 % des Reduktionspotenzials im Bereich Hochbau realisiert werden. Der Rückgang der biotischen Rohstoffe um 11 Mt ist zu ca. 70 % auf den fortgesetzten Trend zur pflanzlichen Ernährung zwischen Status quo und Baseline zurückzuführen. Durch die starke Reduktion im abiotischen Bereich steigt der prozentuale Anteil von biotischem Rohstoffkonsum. Dieser Trend verstärkt sich im Mix-Szenario mit einem Ressourceneinsatz von insgesamt 477 Mt, wovon 68 % auf abiotische und 32 % auf biotische Rohstoffe entfallen. Die Reduktionspotenziale bei den abiotischen Rohstoffen entfallen zu 72 % auf die Sektoren Hochbau, Fahrzeuge und Tiefbau. Bei den biotischen Ressourcen entfallen 61 % der Reduktion allein auf den Nahrungsmittelsektor.

Abbildung 4-10: Rohstoffkonsum, RMC – Differenzierung nach biotischen und abiotischen Rohstoffen



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Gegensatz zum Rohstoffkonsum (RMC) berücksichtigt der Gesamte Materialaufwand (TMC) sowohl die Stoffströme aus der verwerteten als auch aus der nicht verwerteten Entnahme. Die Werte liegen daher immer über denen des Rohstoffkonsums und werden als bessere Annäherung an die Umweltwirkungen der Ressourcenentnahme gewertet. Die Datenlage zu nicht verwerteten Rohstoffentnahmen ist jedoch teils unzureichend, was die Unsicherheiten der Kenngröße Gesamter Materialaufwand erhöht. Der generelle Trend zwischen den Indikatoren bleibt gleich und ist so von Rohstoffkonsum auf Gesamten Materialaufwand übertragbar.

Der Reduktion zwischen Status quo und Baseline im Rohstoffkonsum von 22 % steht daher eine sehr ähnliche Verringerung des Gesamten Materialaufwands um 402 Mt oder 24 % von 1651 Mt auf 1249 Mt gegenüber (Abbildung 4-11). Die geringen Abweichungen zwischen den Indikatoren sind auf die Sektoren Fahrzeuge, IKT- und Haushaltsgeräte sowie Beleuchtung zurückzuführen, wo sich Verschiebungen zwischen verschiedenen Technologien bzw. Energiequellen ergeben. So verursacht der Umstieg von Verbrennern auf Elektromobilität im Fahrzeugsektor auf der einen Seite einen vermehrten Bedarf an Technologiemetallen, die oftmals mit einem schlechteren Verhältnis von verwerteter und nicht verwerteter Rohstoffentnahme als die Basismetalle eines Verbrennungsmotors einhergehen, und zum anderen eine Änderung der Energiequelle von Erdölprodukten auf Strom. Der Gesamte Materialauwand des Fahrzeugsektors wächst daher von Status quo zu Baseline, während der Rohstoffkonsum sinkt. Für die Sektoren IKT & Haushaltsgeräte sowie Beleuchtung ist der Trend dagegen andersherum. Ihr Gesamter Materialaufwand sinkt stärker als ihr Rohstoffkonsum. Hier kann dies auf angenommene Entwicklungen zu Energieeffizienz und Strommix zurückgeführt werden.

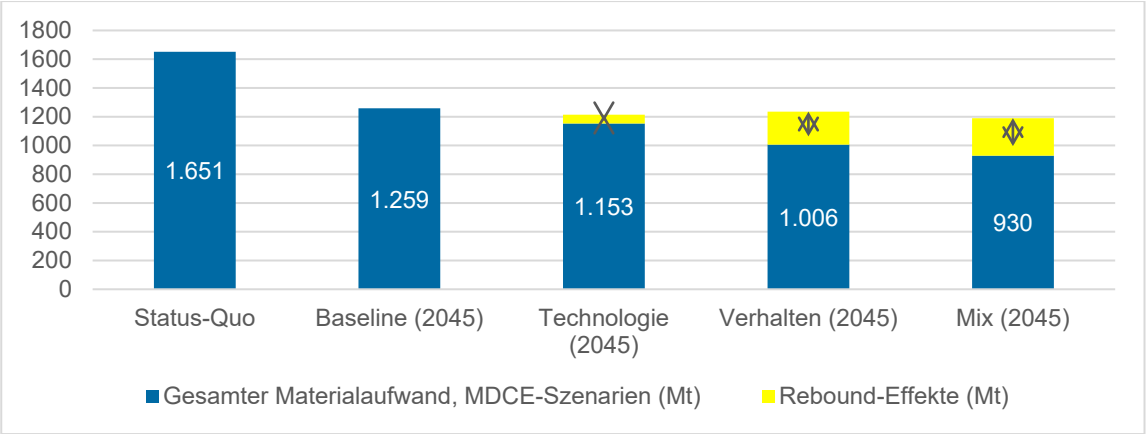
Die Sektoren Hochbau, Fahrzeuge und Nahrungsmittel machen mit 70 % oder 1159 Mt den größten Teil des gesamten Materialaufwands im Status quo aus (Abbildung 4-12). Hier liegt daher ebenso wie für den Rohstoffkonsum der größte potenzielle Hebel für CE-Maßnahmen und eine Reduktion des Materialaufwands. Die Reduktion zwischen Status quo und Baseline von 402 Mt ist zu 69 % auf den Hochbau und den dort wegen des demographischen Wandels angenommenen Rückgang neuer Wohn- und Büroflächen zurückzuführen.

Die folgende Abbildung fasst den **Gesamtmaterialaufwand und potenzielle Einsparungen der CE-Maßnahmen in den MDCE-Szenarien** zusammen. Demnach können im Mix-Szenario im Jahr 2045 ohne Berücksichtigung des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen 329 Mt Rohstoffe im Vergleich zur Baseline eingespart werden, was einer Reduktion von ca. 26 % entspricht.

Technologie- und Verhalten-Szenario liegen bei potenziellen Einsparungen von 106 Mt (-8 %) und 253 Mt (-20 %). Wird der Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen berücksichtigt reduziert sich die Einsparung im Mix-Szenario auf 69-263 Mt. Der Rebound-Effekt führt also zu einer Verringerung der Einsparungen und wirkt sich mit ca. 66-260 Mt aus (Abbildung 4-11). Die Größe des Rebound-Effektes variiert dabei signifikant und liegt an den angenommenen Verteilungsmechanismen des durch die CE-Maßnahmen freiwerdenden verfügbaren Einkommens. Wird das Einkommen in die nicht durch die in dieser Studie von CE-Maßnahmen regulierten Konsumbereiche gelenkt, fällt die Reduktion des Materialaufwands mit 260 Mt immer noch recht hoch aus. Bei einem Shift des freiwerdenden verfügbaren Einkommens hin zu ressourcenintensiveren Produkten, etwa zu Investitionen in Maschinen und Ausrüstungen, fällt der Rebound deutlich höher aus und die Einsparungen liegen nur noch bei etwa 69 Mt im Mix-Szenario gegenüber der Baseline.

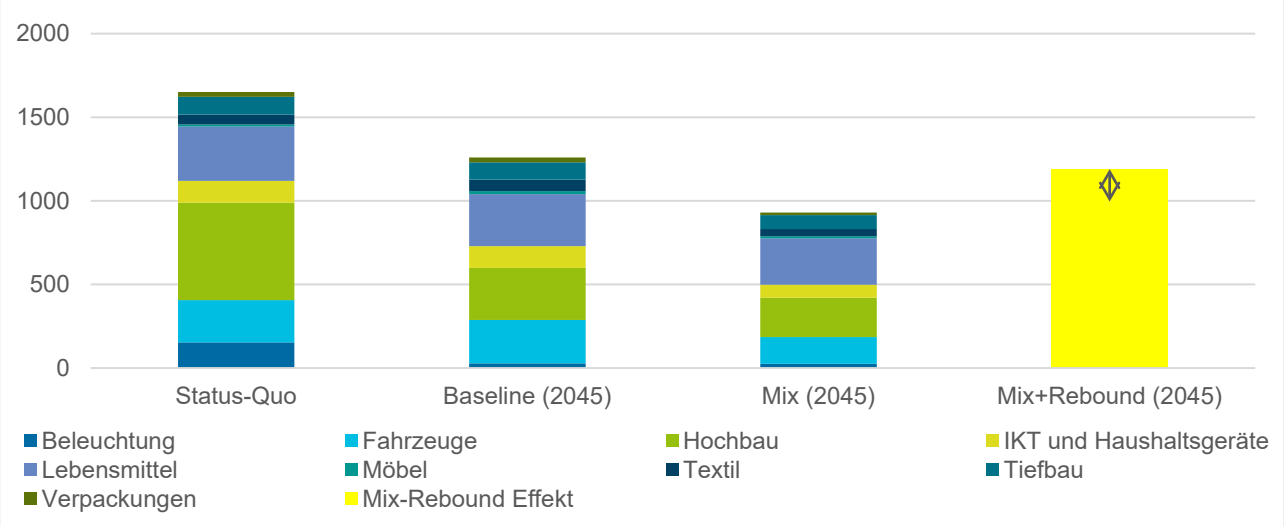
Im Technologie-Szenario fällt der Rebound durch freiwerdendes Einkommen mit 16-61 Mt deutlich geringer aus als im Verhalten- und Mix-Szenario (58-230 Mt bzw. 66-260 Mt). Dies liegt daran, dass die technik-basierten CE-Maßnahmen deutlich weniger verfügbares Einkommen freisetzen als Suffizienzmaßnahmen, die generell unter Verhaltensmaßnahmen eingeordnet wurden. Dem gegenüber steht jedoch auch das begrenzte Potenzial der Einsparung von Materialaufwand durch Maßnahmen des Technologie-Szenarios.

Abbildung 4-11: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mt) in MDCE-Szenarien



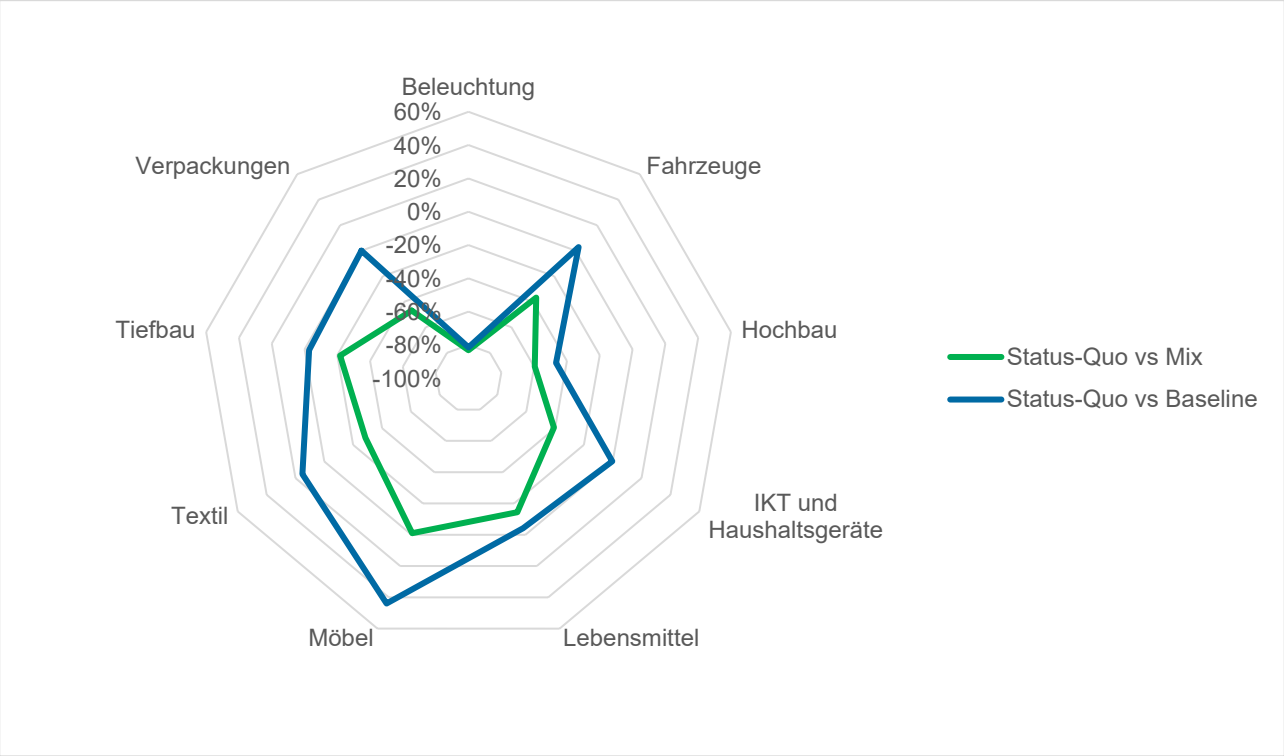
Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-12: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mt) – Mix-Szenario (2045)



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-13: Gesamter Materialaufwand, TMC – Veränderungen (%)



Quelle: Eigene Darstellung.

In der folgenden Tabelle 4-8 ist der absolute Gesamtmaterialaufwand in den jeweiligen MDCE-Szenarien sektoral aufgeteilt und in Tabelle 4-9 als relative Änderung gegenüber der Baseline beziffert. Abbildung setzt die Zahlen der Tabellen in eine grafische Darstellung für das Mix-Szenario um.

Ein Vergleich der absoluten Werte und prozentualen Veränderungen zwischen Rohstoffkonsum und Gesamtmaterialaufwand zeigt ein sehr ähnliches Bild und kann auf die gleichen Trends zurückgeführt werden. Abweichungen ergeben sich wie oben erwähnt durch höhere absolute Reduktionen im Sektor Fahrzeuge, was durch Effekte der Elektrifizierung und Stromversorgung wie oben erwähnt erklärt werden kann. Der im Vergleich zum Rohstoffverbrauch höhere Anteil von IKT und Haushaltsgeräten am Reduktionspotenzial erklärt sich ebenfalls aus dieser Entwicklung.

Die größten Beiträge zur Reduktion des Gesamten Materialaufwands liefern die Sektoren Fahrzeuge, Hochbau und IKT & Haushaltsgeräte mit Einsparungen von 100 Mt, 75 Mt und 53 Mt. Relativ gesehen entspricht dies Reduktionen um 39 % innerhalb des Fahrzeugsektors, 24 % im Hochbau und 41 % im IKT & Haushaltsgeräte Sektor. Diese der Sektoren liefern dadurch 69 % der gesamten Reduktionen im Mix-Szenario. Weitere 24 % der Reduktion im Mix-Szenario liefern die Sektoren Lebensmittel, Textilien und Tiefbau.

Tabelle 4-8: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mt) in MDCE-Szenarien

	Status quo	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Beleuchtung	154	29	28	26	26
Fahrzeuge	252	259	254	166	160
Hochbau	583	311	295	244	236
IKT und Haushaltsgeräte	131	131	87	97	78
Lebensmittel	324	310	301	285	277
Möbel	13	19	16	13	13
Textil	60	69	63	48	43
Tiefbau	106	103	83	103	83
Verpackungen	29	29	24	24	15
Rebound min	0	0	16	58	66
Rebound max	0	0	61	230	260
Gesamt	**1651**	**1259**	**1169-1214**	**1063-1235**	**996-1190**

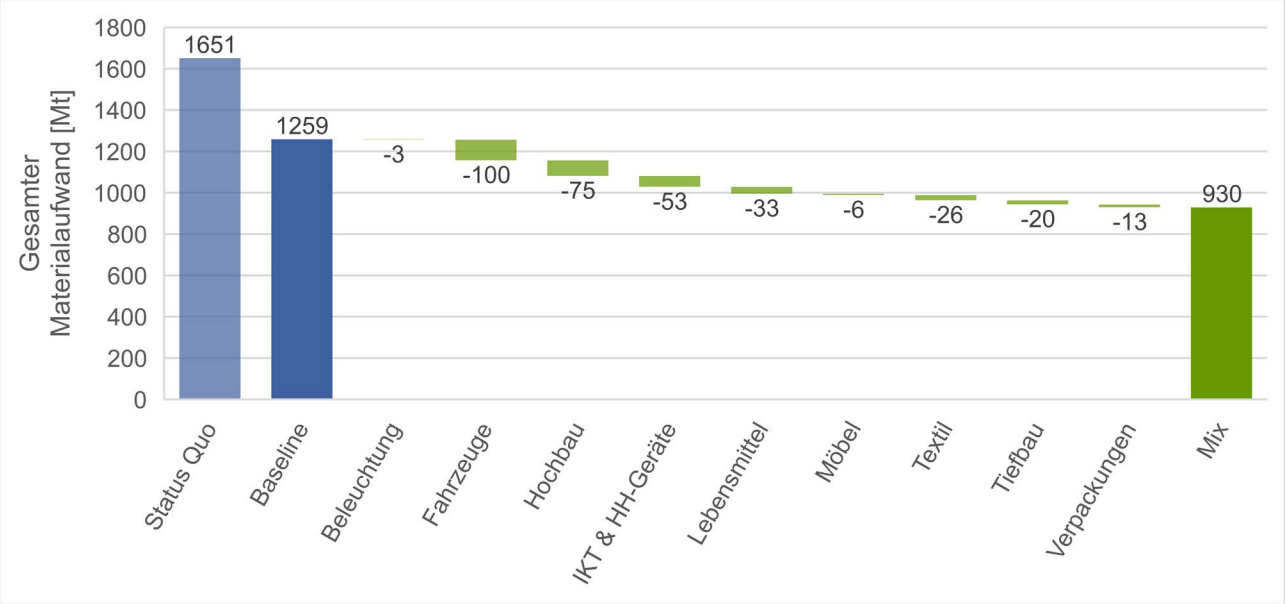
Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4-9: Gesamter Materialaufwand, TMC – Veränderungen (%)

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	-1 %	-9 %	-9 %
Fahrzeuge	-2 %	-36 %	-39 %
Hochbau	-5 %	-21 %	-24 %
IKT und Haushaltsgeräte	-33 %	-26 %	-41 %
Lebensmittel	-3 %	-8 %	-11 %
Möbel	-12 %	-28 %	-31 %
Textil	-7 %	-30 %	-38 %
Tiefbau	-19 %	-1 %	-19 %
Verpackungen	-16 %	-16 %	-47 %

Quelle: Eigene Darstellung.

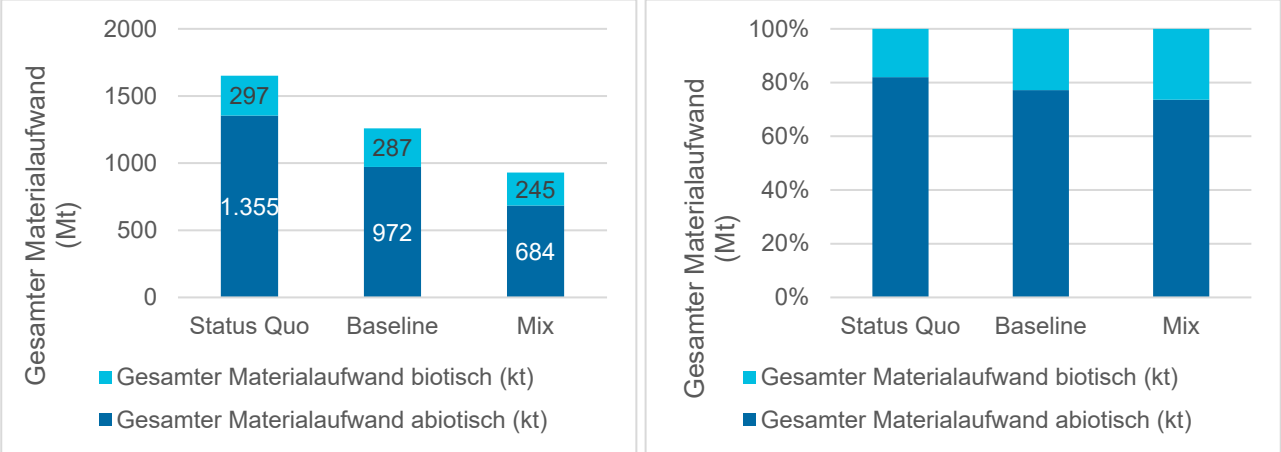
Abbildung 4-14: Gesamter Materialaufwand, TMC – Einsparungen je Sektor im Mix-Szenario



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Status quo beträgt der Gesamtmaterialaufwand insgesamt 1651 Mt, davon 82 % abiotische und 18 % biotische Rohstoffe. Der Gesamtmaterialaufwand sinkt im Baseline-Szenario auf insgesamt 1259 Mt, wobei 77 % auf abiotische und 23 % auf biotische Rohstoffe entfallen. Die Einsparungen erfolgen folglich vor allem im Bereich der abiotischen Rohstoffe mit einem Rückgang von 329 Mt, wobei 70 % dieser Reduktion auf den Hochbau und einen kleineren Bedarf an Wohn- und Bürofläche durch den demographischen Wandel zurückgeführt werden können. Der leichte Rückgang bei den biotischen Rohstoffen ist entsprechend dem Rohstoffkonsum auf den anhaltenden Trend zur pflanzlichen Ernährung zwischen Status quo und Baseline zurückzuführen. Durch die starke Reduktion im abiotischen Bereich steigt der prozentuale Anteil von biotischem Gesamtmaterialaufwand. Dieser Trend verstärkt sich weiter im Mix-Szenario mit einem Materialaufwand von insgesamt 930 Mt, wovon 74 % auf abiotische und 26 % auf biotische Rohstoffe entfallen. Die Reduktionspotenziale bei den abiotischen Rohstoffen entfallen zu 76 % auf die Sektoren Fahrzeuge, Hochbau und IKT & Haushaltsgeräte. Bei den biotischen Ressourcen entfallen 63 % der Reduktion auf den Nahrungsmittelsektor.

Abbildung 4-15: Gesamter Materialaufwand, TMC – Differenzierung nach biotischen und abiotischen Rohstoffen



Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.1.3 Landnutzung/ Biodiversität

In der ökologischen Dimension Landnutzung gibt es bereits in der Baseline einen kleinen Rückgang von 2,5 Mio. ha auf 28,5 Mio. ha gegenüber dem Status quo von heute 31 Mio. ha. Dies ist vor allem auf eine Trendfortsetzung im Sektor Lebensmittel zurückzuführen. Dieser macht im Status quo mit 57 % den überwiegenden Teil der Landnutzung der neun Sektoren aus. Der bereits heute beobachtete und damit in der Baseline in beschränktem Umfang fortgeführte Trend zur stärker pflanzenbasierten Ernährung, trägt daher den größten Teil dieser Reduktion zur Baseline bei. Weitere kleine Veränderungsbeiträge zwischen Status quo und Baseline kommen aus den Sektoren Fahrzeuge und Hochbau. So ist im Hochbau bereits in der Baseline ein deutlicher Rückgang der Bautätigkeit durch den angenommenen demographischen Wandel hinterlegt.

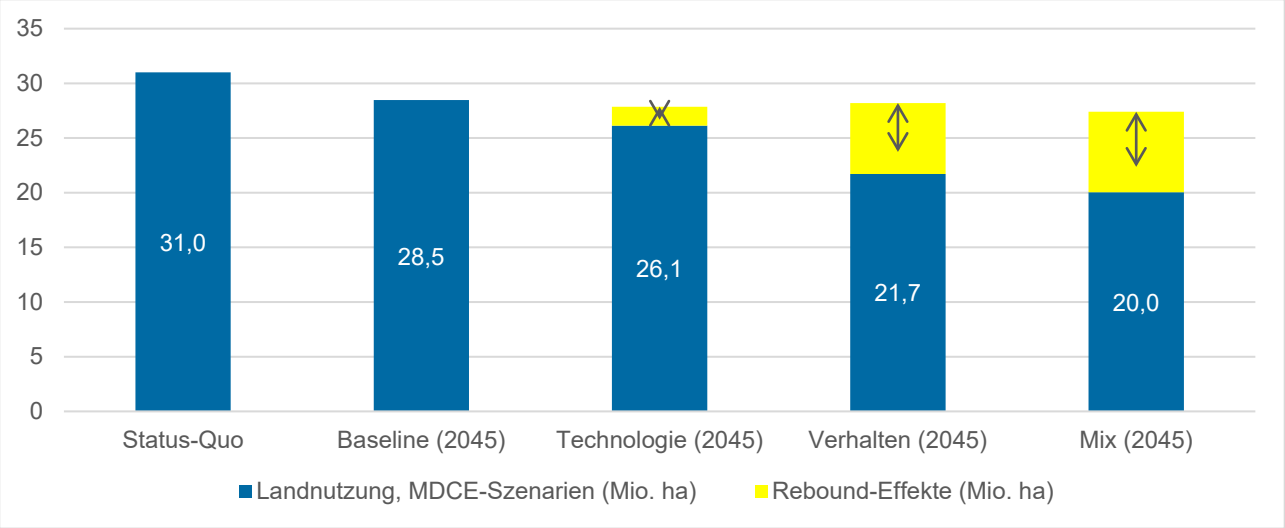
Im Vergleich zur Baseline kann das MDCE-Mix-Szenario die Landnutzung noch einmal deutlich um 8,5 Mio. ha oder 30 % reduzieren. Der Lebensmittelsektor hat den größten Anteil an diesem Indikator, und entsprechend können durch CE-Maßnahmen in diesem Sektor auch der größte Reduktionsbeitrag mit 3,6 Mio. ha erzielt werden. Neben dem Lebensmittelsektor können auch die Sektoren Fahrzeuge, Textil und Hochbau relevante Beiträge zur Reduktion der Landnutzung durch CE-Maßnahmen beitragen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Sektoren im Vergleich zum Lebensmittelsektor zwar kleinere aber im Vergleich zu den restlichen Sektoren dennoch deutlich relevantere Anteile an der Landnutzung ausmachen. Dementsprechend sind Maßnahmen zur Reduktion der Umweltwirkungen in diesen Sektoren auch wirkungsvoller.

Das Technologie-Szenario erreicht mit einer Landnutzung von 26,1 Mio. ha nur eine kleine Reduktion von 2,4 Mio. ha oder 8 % gegenüber der Baseline. Das Verhalten-Szenario erreicht dagegen mit einer Reduktion um 6,8 Mio. ha oder 24 % auf 21,7 Mio. ha Landnutzung fast die Einsparungen des optimierten Mix-Szenarios. Dies zeigt, dass die Verhaltensänderungen für eine Reduktion der Landnutzung eine deutlich größere Bedeutung haben als die technischen CE-Maßnahmen im Technologie-Szenario.

Durch Einbezug des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen fällt die Reduktion der Landnutzung erwartungsgemäß geringer aus (Abbildung 4-16). Im Mix-Szenario liegt die Landnutzung dann bei 22,4-27,4 Mio. ha, was einer verbliebenen Einsparung von 1,1-6,1 Mio. ha oder 4-21 % gegenüber der Baseline von 28,6 Mio. ha entspricht (Abbildung 4-17). Diese große Spannweite zeigt

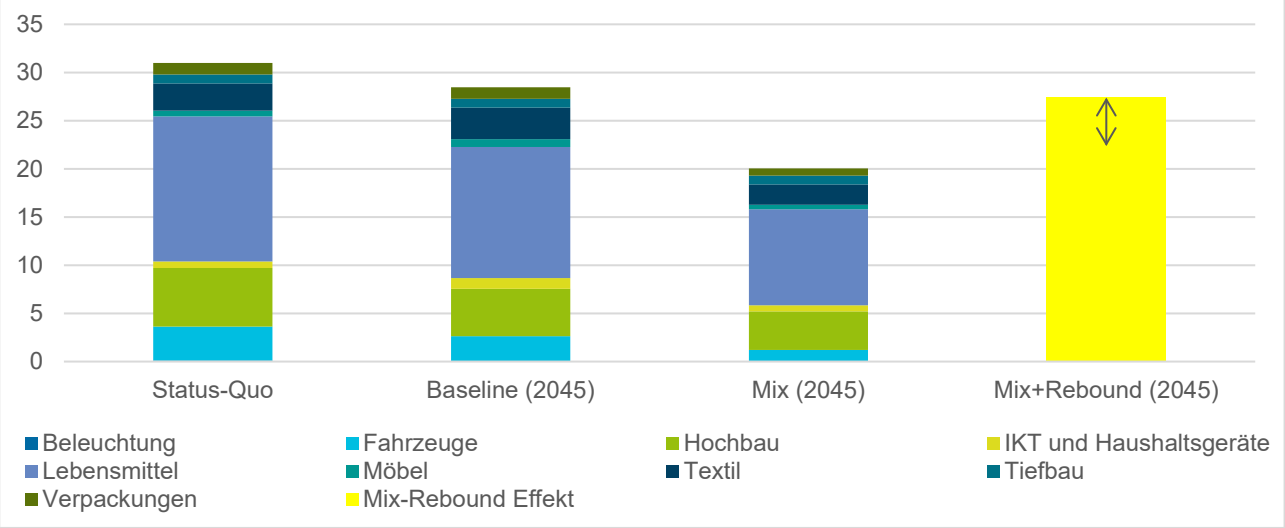
die Relevanz der Lenkung des Rebounds auf. Die Auswirkungen des Rebounds sind deutlich kleiner, wenn eine Umverteilung von durch CE-Maßnahmen freiwerdendem verfügbaren Einkommen auf Konsum in den hier nicht betrachteten Sektoren stattfindet. Deutlich größer sind die negativen Wirkungen des Rebounds, wenn die Investition des freiwerden verfügbaren Einkommens etwa in Maschinen und Ausrüstungen getätigt werden. In den Technologie- und Verhalten-Szenario würde die Landnutzung unter Einbezug des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen bei 26,7-27,9 Mio. ha bzw. 23,7-28,2 Mio. ha liegen. Für diese zwei Szenarien kann der Rebound-Effekt somit die gleiche Größenordnung wie die Einsparungen der CE-Maßnahmen erreichen und muss dementsprechend vorsichtig gestaltet werden.

Abbildung 4-16: Landnutzung (Mio. ha) in MDCE-Szenarien



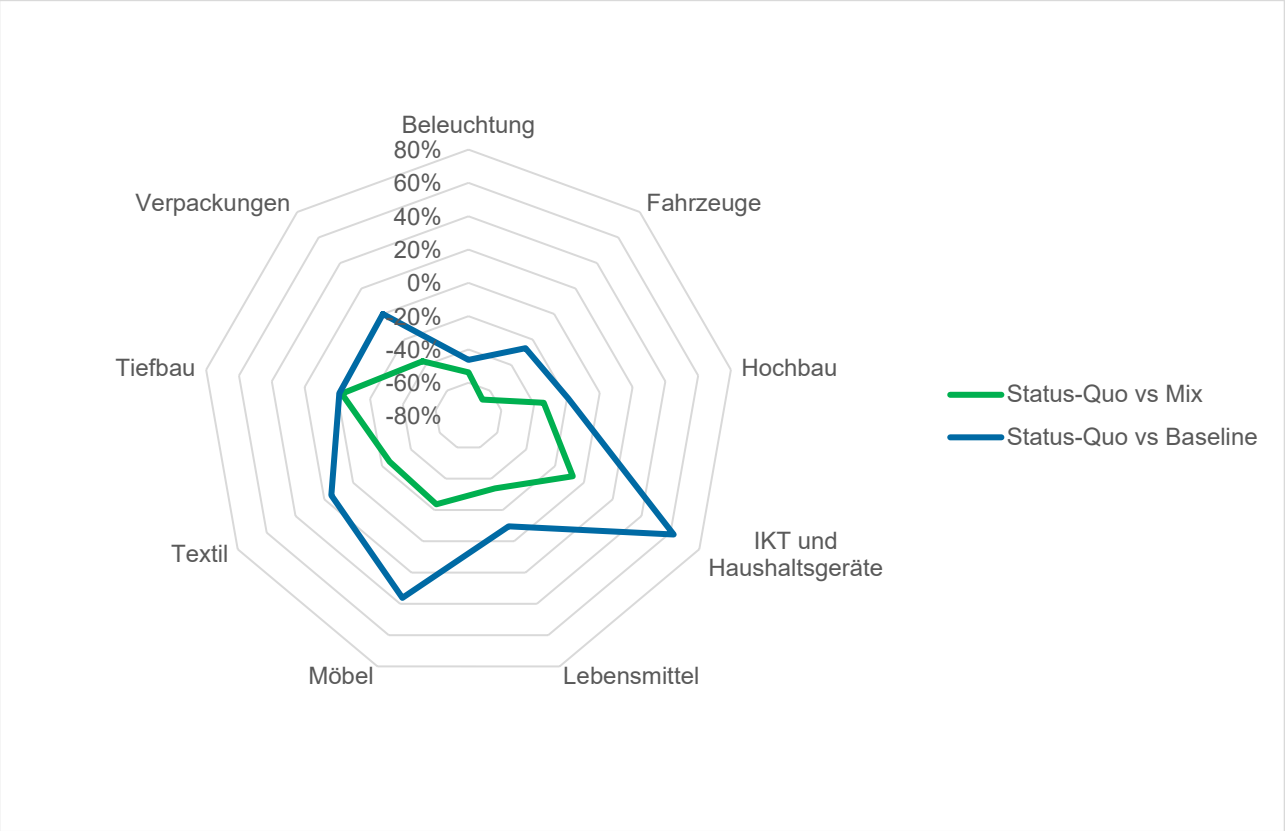
Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-17: Landnutzung (Mio. ha) – Mix-Szenario (2045)



Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-18: Landnutzung – Veränderungen (%)



Quelle: Eigene Darstellung

Die Tabelle 4-10 zeigt die sektorale Verteilung der Landnutzung sowie die Spannweite des Rebound-Effektes durch freiwerdendes Einkommen. Tabelle 4-11 zeigt die Einsparungen in absoluten Reduktionen (Mio. ha) in den drei MDCE-Szenarien im Vergleich zum Baseline-Szenario. Tabelle 4-12 übersetzt dies in die prozentuale Veränderung jedes Sektors gegenüber der Baseline und damit den Potenzialen der CE-Maßnahmen in jedem Sektor in der Dimension Landnutzung. Abbildung 4-19 überträgt diese Zusammenhänge in eine grafische Darstellung für das Mix-Szenario.

Wie bereits erwähnt macht der Lebensmittelsektor den größten Anteil der Landnutzung aus. Die CE-Maßnahmen zeigen eine deutliche Wirkung und reduzieren die Landnutzung des Sektors um 3,6 Mio. ha von 13,6 Mio. ha in der Baseline auf 10,0 Mio. ha im Mix-Szenario. Dies entspricht einer Reduktion von 27 % innerhalb des Lebensmittelsektors. Weitere relevante Reduktionen gelingen durch die CE-Maßnahmen im Fahrzeug- und Textilsektor. Ersterer vermindert die Landnutzung um 1,4 Mio. ha oder 55 % von 2,6 Mio. ha in der Baseline auf 1,2 Mio. ha im Mix-Szenario. Im Textilsektor wird um 1,1 Mio. ha oder 35 % von 3,3 Mio. ha in der Baseline auf 2,1 Mio. ha im Mix-Szenario vermindert. Zweitgrößten Anteil an der Landnutzung in der Baseline hat eigentlich der Hochbau mit 4,9 Mio. ha. Dieser kann seine Landnutzung im Mix-Szenario jedoch nur um 18 % oder 0,9 Mio. ha auf 4,0 Mio. ha reduzieren, leistet damit jedoch einen immer noch relevanten Beitrag.

Tabelle 4-10: Landnutzung (Mio. ha) in MDCE Szenarien

	Status quo	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Beleuchtung	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Fahrzeuge	3.5	2.6	2.5	1.2	1.2
Hochbau	6.1	4.9	4.9	4.0	4.0
IKT und Haushaltsgeräte	0.7	1.1	0.7	0.8	0.6
Lebensmittel	15.0	13.6	12.3	10.9	10.0
Möbel	0.6	0.8	0.7	0.5	0.5
Textil	2.8	3.3	3.1	2.3	2.1
Tiefbau	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Verpackungen	1.2	1.2	0.9	1.0	0.8
Rebound min	0.0	0.0	0.5	2.0	2.3
Rebound max	0.0	0.0	1.7	6.5	7.4
Gesamt	**31.0**	**28.5**	**26.7-27.9**	**23.7-28.2**	**22.4-27.4**

Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4-11: Landnutzung in MDCE Szenarien – Einsparungen (Mio. ha)

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	0,00	-0,01	-0,01
Fahrzeuge	-0,1	-1,4	-1,4
Hochbau	0,0	-0,9	-0,9
IKT und Haushaltsgeräte	-0,4	-0,3	-0,5
Lebensmittel	-1,3	-2,7	-3,6
Möbel	-0,1	-0,3	-0,4
Textil	-0,2	-1,0	-1,1
Tiefbau	0,0	0,0	0,0
Verpackungen	-0,3	-0,2	-0,4

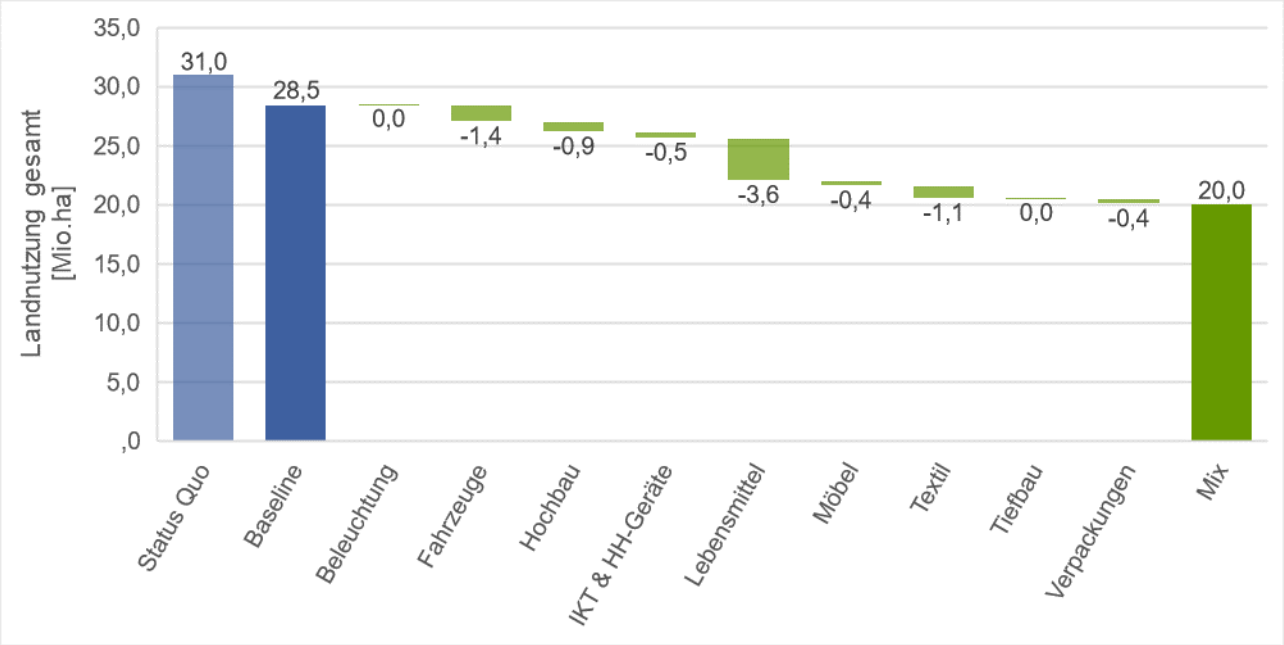
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 4-12: Landnutzung (Mio. ha) in MDCE Szenarien – Veränderungen (%)

	Baseline vs Technologie	Baseline vs Verhalten	Baseline vs Mix
Beleuchtung	-4 %	-10 %	-14 %
Fahrzeuge	-2 %	-52 %	-55 %
Hochbau	-1 %	-18 %	-18 %
IKT und Haushaltsgeräte	-33 %	-29 %	-43 %
Lebensmittel	-10 %	-20 %	-27 %
Möbel	-14 %	-40 %	-44 %
Textil	-5 %	-30 %	-35 %
Tiefbau	-2 %	0 %	-2 %
Verpackungen	-21 %	-16 %	-37 %

Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-19: Landnutzung – Reduktionspotenziale je Sektor

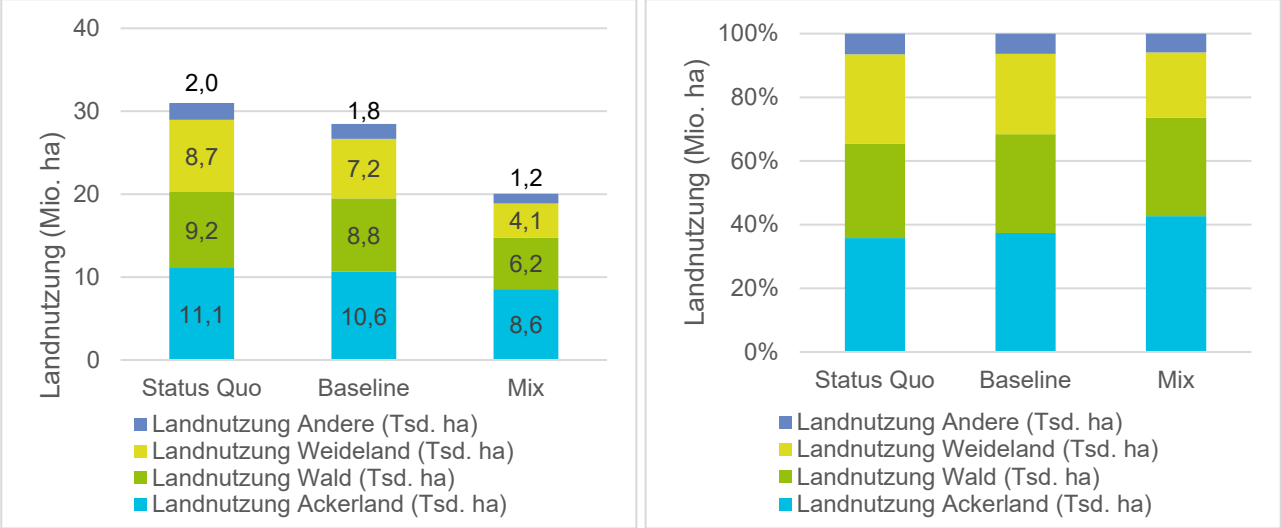


Quelle: Eigene Darstellung.

Im Status quo beträgt die Landnutzung, die mit der Produktion und Nutzung der in den MDCE-Szenarien betrachteten Gütern verbunden ist, insgesamt 31,0 Mio. ha. Davon entfallen 36 % auf Ackerland (11,1 Mio. ha), 29 % auf Waldflächen (9,2 Mio. ha), 28 % auf Weideland (8,7 Mio. ha) und 6 % auf sonstige Nutzungen (2,0 Mio. ha). Die gesamte Landnutzung sinkt im Baseline-Szenario auf insgesamt 28,4 Mio. ha. Absolut gesehen geht die Landnutzung in Bezug auf alle Flächenarten zurück, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß. An der verbleibenden genutzten Fläche steigt der Anteil von Ackerflächen dadurch auf 37 % und der von Waldflächen auf 31 %. Die Weideflächen reduzieren sich auf 25 %. Dies spiegelt den Trend zu mehr pflanzlicher Ernährung wider. Im Mix-Szenario kommt es zu einer Reduktion der Landnutzung auf insgesamt 20,1 Mio. ha, wobei Ackerland dann einen Anteil von 43 % an der Landnutzung hat, Waldflächen einen Anteil von 31 % und Weideland einen Anteil von 20 %. Alle Nutzungsarten erfahren einen Rückgang, besonders deutlich fällt er für

Weideland aus. Die deutliche Reduktion von Fleisch- und Milchprodukten zeigt sich in diesen Ergebnissen deutlich. Zusätzlich zum Lebensmittelsektor können auch der Fahrzeug-, der Textil- und der Hochbausektor wesentliche Beiträge zur Reduktion der Flächeninanspruchnahme leisten.

Abbildung 4-20: Landnutzung – Differenzierung nach Flächennutzungsart



Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.2 Sektorspezifische Ergebnisse

Im Folgenden werden die ökologischen Wirkungen der Sektoren vorgestellt, dies beinhaltet die vier Indikatoren THG-Emissionen, Rohstoffkonsum (RMC), Gesamtmaterialaufwand (TMC) und Landnutzungsänderungen. Die Sektor-spezifischen Ergebniskapitel folgen jeweils derselben Reihenfolge: Zunächst wird die Liste und Nummerierung der modellierten CE-Maßnahmen vorgestellt – die Nummerierung entspricht der in den Abbildungen verwendeten. Dann schließt sich jeweils zuerst ein Szenario-Vergleich und dann ein Maßnahmenvergleich inkl. Abbildungen für die vier betrachteten Indikatoren an. In relevanten Sektoren (Lebensmittel, Textilien, Holz/Möbel) erfolgt ein Exkurs zur Biodiversitätsbewertung) und schließlich werden die Ergebnisse im Hinblick auf Datenunsicherheiten und z.T. weitere Studien eingeordnet.

4.1.2.1 Fahrzeuge und Batterien

CE-Maßnahmen in den Sektoren Fahrzeug und Batterie

Im Sektor Fahrzeuge und Batterien wurden die Auswirkungen der folgenden Maßnahmen auf PKW analysiert:

1. Reduktion des Individualverkehrs
    a. ÖPV ersetzt Individualverkehr
    b. Carsharing ersetzt Individualverkehr
    c. Ridesharing ersetzt Individualverkehr
2. Weitere Maßnahmen auf Fahrzeugebene

   a. Reduktion der Fahrzeuggröße
   b. Verlängerung der Nutzungsphase
   c. End of Life (EoL) Recycling der PKW
   d. Remanufacturing von PKW-Komponenten
3. Maßnahmen auf Batterieebene für elektrisch angetriebene PKW (E-PKW)
   a. Reduktion der Batteriekapazität
   b. Langlebiges Design der Fahrzeugbatterie
   c. End of Life Recycling der Fahrzeugbatterie
   d. Repurpose der EoL-Batterien

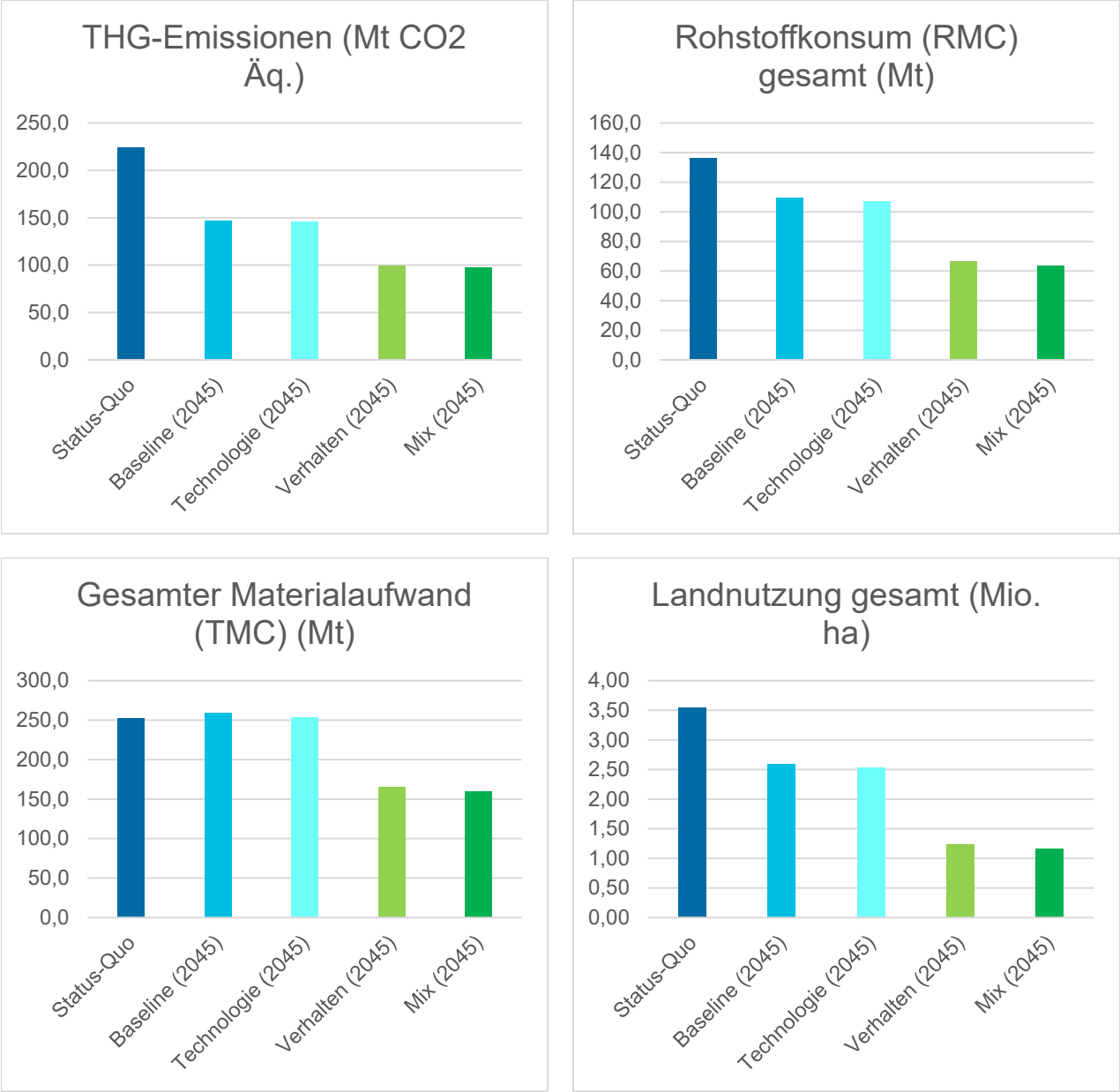
Eine Beschreibung der Maßnahmen, deren Ausprägung in den Szenarien und ihrer Modellierung befinden sich im Anhang (7.2.1). Weiterhin sind Daten und Annahmen im Anhang (7.2.1) zusammengefasst. Auch die zugrundeliegenden Annahmen zur Diffusion elektrischer Antriebstechnologien und die berücksichtigen Wechselwirkungen zwischen den bzw. die Reihenfolge der Maßnahmen sind dort beschrieben. Dieser Reihenfolge kommt aufgrund der Interaktion der Maßnahmen eine wesentliche Bedeutung zu (bspw. Sekundärmaterialverfügbarkeit bei geringeren Fahrzeugbeständen).

Szenarienvergleich

Das **Baseline-Szenario** zeigt gegenüber dem Status quo Einsparungen bei THG-Emissionen, Landnutzung und Rohstoffkonsum, während sich der Gesamtmaterialaufwand erhöht (Abbildung 4-21). Zugrunde liegen zwei generelle Annahmen:

- Zum einen wirken die meisten der betrachteten CE-Maßnahmen bereits im Baseline-Szenario, allerdings in schwacher Ausprägung (s. Anhang 7.2.1). Hintergrund ist, dass für die meisten dieser Maßnahmen aus aktuellen Trends auch ohne spezifische politische Anstrengungen ein Einspareffekt erwartet werden kann. Insbesondere die Reduktion des Individualverkehrs durch Verstärkung von ÖPV, Car- und Ridesharing (Maßnahmen 1a-c) wirkt sich bereits im Baseline-Szenario verringernd auf alle ökologischen Effekte aus.
- Zum anderen wird in den Szenarien – unabhängig von Bemühungen um eine Circular Economy – eine verstärkte Diffusion elektrischer Antriebstechnologien für PKW angenommen. Insbesondere bei den THG-Emissionen führt dieser Trend zu zusätzlichen Einsparungen, so dass die THG-Emissionen im Baseline-Szenario gegenüber dem Status quo insgesamt um 35 % sinken. Hingegen hat die Diffusion elektrischer Antriebstechnologien auf Rohstoffkonsum und Materialaufwand einen erhöhenden Effekt, da elektrische Antriebstechnologien mit einem erhöhten Materialbedarf verbunden sind. Dies führt beim Gesamtmaterialbedarf sogar insgesamt zu ansteigenden Umwelteffekten (+3 %), während beim Rohstoffkonsum verringerte Einsparungen (-20 %) zu erwarten sind (Abbildung 4-21). Im Gegensatz zum RMC betrachtet der TMC-Materialflüsse aus verwerteter, aber auch unverwerteter Entnahme.
- Die Landnutzung kann im Baseline-Szenario um 27 % reduziert werden. Diese Einsparungen sind hauptsächlich durch die verringerte Anzahl an Fahrzeugen verursacht, während bzgl. des Flächenverbrauchs keine eindeutige Aussage für den Vergleich von E-PKW und konventionellen PKW getroffen werden kann.

Abbildung 4-21: Vergleich der Szenarien – *Fahrzeuge und Batterien*



Quelle: Eigene Darstellung.

Das **Mix-Szenario** stellt für alle ökologischen Effekte den Best Case dar. Die Landnutzung kann hier gegenüber dem Status quo um 67 % reduziert werden, folglich können 40 Prozentpunkte mehr als im Baseline-Szenario eingespart werden. Beim Gesamtmaterialaufwand spart das Mix-Szenario 39 % bzw. 37 % gegenüber Baseline und Status quo. Der Rohstoffkonsum (RMC) sinkt im Mix-Szenario um 53 % gegenüber dem Status Quo und 42 % gegenüber dem Baseline-Szenario. Schließlich ist auch bei den THG-Emissionen noch eine Steigerung der Einsparungen von 35 % Zwischen Status Quo und Baseline um 22 Prozentpunkte auf 57 % zwischen Status Quo und Mix-Szenario möglich. Die Emissionsreduktion zwischen Mix-Szenario und Baseline beträgt damit 34 %.

Hinsichtlich der **Szenarien Technologie und Verhalten** ist für alle ökologischen Kategorien (Treibhausgasemissionen, Ressourceninanspruchnahme, Landnutzung) die gleiche Tendenz zu be-

obachten: Das Technologie-Szenario zeigt gegenüber dem Baseline-Szenario nur marginale Einsparungspotenziale auf, während das Verhalten-Szenario starke Einsparungspotenziale beinhaltet, welche dann auch das Mix-Szenario dominieren (Abbildung 4-21).

Maßnahmenvergleich

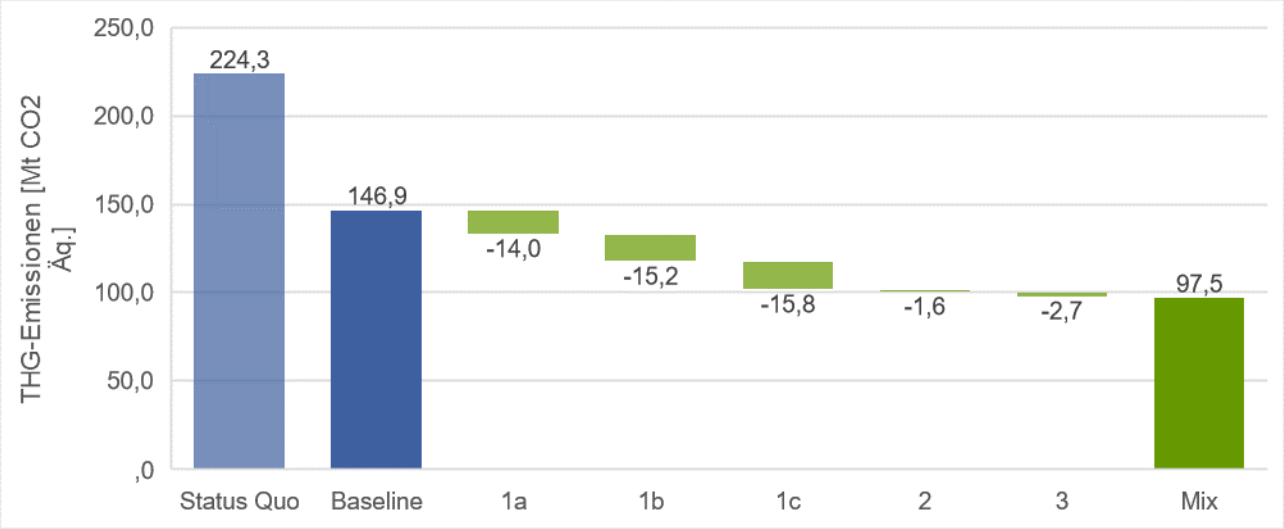
Durch CE-Maßnahmen können alle analysierten Umwelteffekte im Fahrzeugsektor deutlich reduziert werden (Abbildung 4-22, Abbildung 4-23, Abbildung 4-24 und Abbildung 4-25). Auch bei den THG-Emissionen können zusätzlich zu den durch E-Mobilität auftretenden Effekten signifikante Einsparungen erreicht werden. Das stärkste Einsparpotenzial geht auf die Reduktion des Individualverkehrs durch ÖPV, Car- und Ridesharing zurück (Maßnahmen 1a-c). Da es hier keiner technischen Forstschritte, sondern lediglich Verhaltensänderungen bedarf, gibt es keine Unterschiede zwischen Baseline und Technologie-Szenario. Die Einsparungen im Verhalten- und Mix-Szenario werden jedoch hauptsächlich durch diese Maßnahmen erreicht.

Für sich betrachtet haben auch alle weiteren Maßnahmen signifikante Einsparungspotenziale, allerdings in deutlich geringerem Maße als die Maßnahmen 1a-c. In der Darstellung der Gesamtergebnisse sind diese Effekte weiter abgeschwächt, da es starke Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen gibt. Durch die Substitutionsmaßnahmen (1a-c) wird die Anzahl der PKW reduziert. Dadurch wirken die Maßnahmen Verlängerung der Lebensdauer der PKW bzw. der PKW-Batterie sowie Reduktion der PKW-Größe bzw. Batteriekapazität auf eine geringere Anzahl von PKW und haben geringere Effekte. Bei den Maßnahmen, die am EoL der PKW ansetzen (Recycling, Remanufacturing, Repurpose) steht als Resultat aller zuvor analysierten Maßnahmen weniger Ausgangsmaterial zur Verfügung. Würde man die Maßnahmen in umgekehrter Reihenfolge betrachten, würden sich die relativen Beiträge in Abbildung 4-22 verändern. Maßnahmen 1a-c würden aber noch immer die dominierenden Effekte darstellen.

Mit Ausnahme der Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung (2b und 3b) haben alle Maßnahmen im Verhalten-Szenario stärkere Einsparpotenziale als im Technologie-Szenario. Die Lebensdauerverlängerung der E-PKW ist abhängig von der Lebensdauerverlängerung der Batterie als lebensdauerlimitierendes Bauteil. Hier sind durch technische Optimierung signifikante Einsparungspotenziale zu erreichen. Ebenso gibt es Einsparungspotenziale durch verändertes Konsumentenverhalten beim Fahren und Laden. Daher sind die Einsparungspotenziale für diese Maßnahme im Mix-Szenario am höchsten. Die Reduktion der Fahrzeuggröße und Batteriekapazität ist hingegen nicht von technischen Parametern, sondern ausschließlich von Verhaltensänderungen abhängig. Bei Recycling und Remanufacturing besteht der wesentliche Hebel in der Reduktion des (illegalen) Exports nicht mehr fahrtüchtiger Fahrzeuge. Hingegen liegt die Recyclingquote von offiziell in Deutschland verwerteten Fahrzeugen bereits bei 95 %, so dass es hier nur geringe Potenziale durch technische Steigerungen gibt. Daher werden Steigerungspotenziale nur in den Szenarien Verhalten und Mix erreicht.

Treibhausgasemissionen

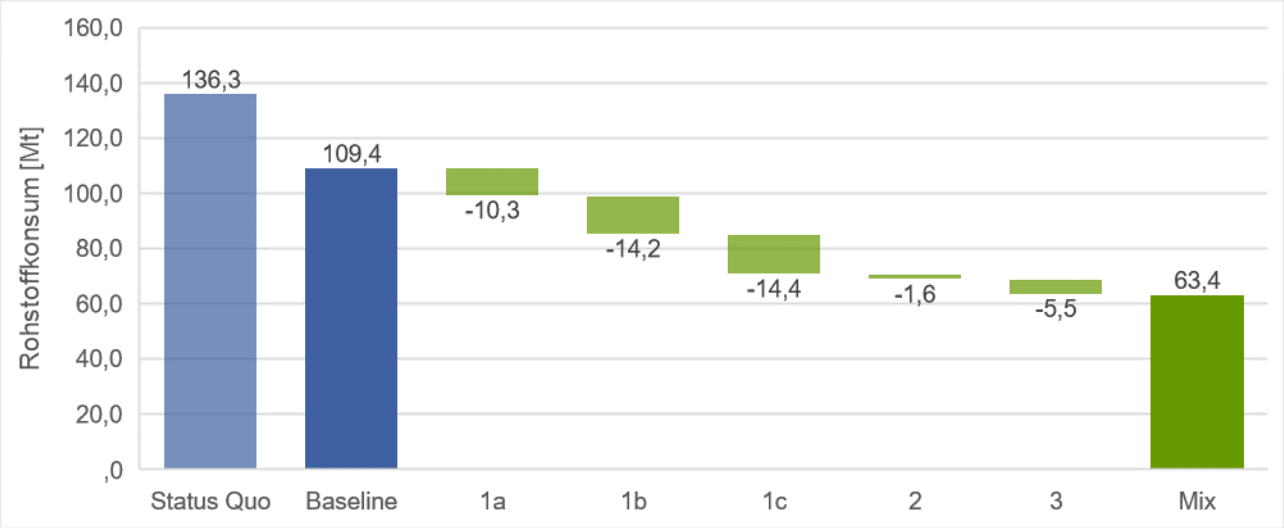
Abbildung 4-22: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien*



Quelle Eigene Darstellung.

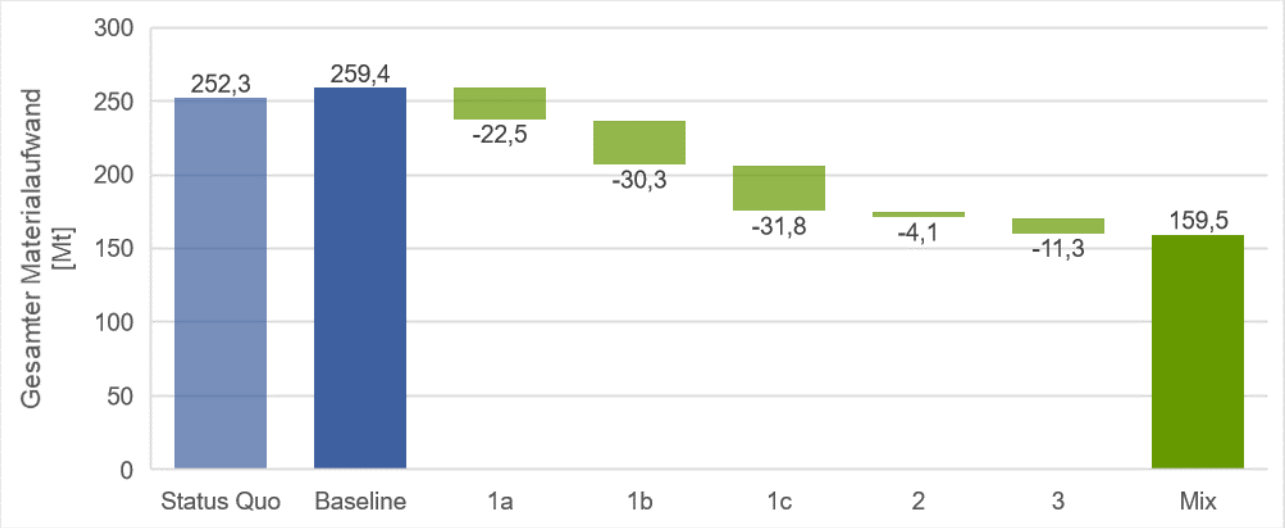
Ressourceninanspruchnahme

Abbildung 4-23: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien*



Quelle: Eigene Darstellung.

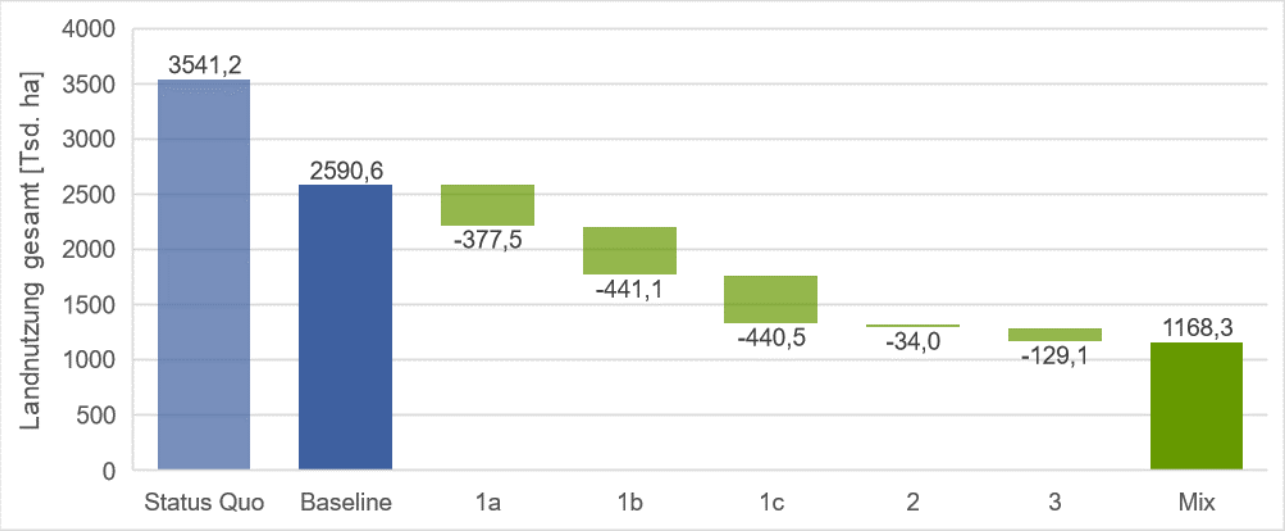
Abbildung 4-24: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien*



Quelle: Eigene Darstellung.

Landnutzung

Abbildung 4-25: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien*



Quelle: Eigene Darstellung.

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Da die Maßnahmen zur Reduktion des Individualverkehrs durch ÖPV, Car- und Ridesharing die größten Effekte in allen Kategorien erzeugen, wirken sich die diesbezüglich getroffenen Annahmen auch am stärksten auf die Ergebnisse aus. Details zu allen Annahmen sind im Anhang (7.2.1) zu finden.

Hinsichtlich der Rahmenannahmen wurde die Diffusion elektrischer Antriebstechnologien zentral in den Szenarien berücksichtigt. Hingegen konnte die zukünftige Entwicklung zum autonomen Fahren nur indirekt berücksichtigt werden, d.h. entsprechende Potenziale für einzelne Maßnahmen wurden mitbedacht, eine Veränderung der Materialzusammensetzung oder Produktionsstrukturen konnte allerdings nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden konnten zukünftige Veränderungen der Import-Export-Struktur im Allgemeinen, d.h. unabhängig von der Entwicklung der E-Mobilität.

Alle Ergebnisse im Sektor Fahrzeuge beruhen auf den Daten der MRIO- und EE-MRIO-Tabellen der Datenbank Exiobase, da alle Effekte einheitlich über den MRIO-Ansatz berechnet wurden. Die Ergebnisse beziehen sich daher auf ökologische Effekten des Fahrzeugsektors und damit verbundener Sektoren als Ganzes, d.h. produktspezifische Daten aus Ökobilanzen wurden in den vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt. Ein Abgleich mit entsprechenden Bottom-up-Berechnungen wäre für zukünftige Forschungsvorhaben sehr interessant, war aber im Rahmen dieses Forschungsvorhabens aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Bedingt dadurch, dass der Zeithorizont weit in der Zukunft liegt, unterliegen alle Annahmen starken Unsicherheiten. In den verschiedenen Szenarien werden daher Entwicklungen aufgezeigt, die durch ein starkes politisches Engagement gegenüber der Baseline erreicht werden *könnten*. Es werden also Potenziale skizziert, wohingegen die tatsächlichen Entwicklungen nicht vorausgesehen werden können. In diesem Sinne lässt sich aus den Ergebnissen in erster Linie eindeutig ableiten, dass Verhaltensänderungen das größte Potenzial haben, die Umweltauswirkungen des Verkehrssektors zu reduzieren. Eine Reduktion der PKW-Anzahl durch Car-Sharing, Ride-Sharing und ÖPV wird auch in anderen Studien als entscheidend für Einsparungen im Verkehrssektor gesehen (u.a. Pauliuk et al. (2021), Hertwich et al. (2020), Groneweg et al. (2021) und BUND (2021)).

Dadurch, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Maßnahmen berücksichtigt wurden, sind die Gesamteinsparpotenziale realistisch dargestellt. Eine einfache Summierung der Effekte jeder einzelnen Maßnahme würde hingegen zu Doppelzählungen und damit falschen Ergebnissen führen. Dieses Vorgehen hat aber auch zur Folge, dass der Effekt der einzelnen Maßnahmen in der Gesamtdarstellung von ihrer Reihenfolge abhängt. Da die Reduktion der Fahrzeuge durch die Maßnahmen 1a-c in den Szenarien Verhalten und Mix sehr viel stärker ausgeprägt sind, können weitere Maßnahmen hier nur auf eine geringere Anzahl an PKW wirken und somit nur geringere Einsparpotenziale heben. Im Vergleich zum Baseline Szenario kann das sogar als negativer Einspareffekt erscheinen. Um diesbezügliche Verwirrungen zu vermeiden, wurden die weiteren Maßnahmen in 2 a - d und 3 a - d in der Ergebnisdarstellung gebündelt.

4.1.2.2 Hoch- und Tiefbau

Die Darstellung der Ergebnisse für die Sektoren Hoch- und Tiefbau erfolgt gemeinsam, obwohl die zugrundeliegende Modellierung und Parametrisierung der Maßnahmen getrennt erfolgte (siehe 7.2.2).

CE-Maßnahmen in den Sektoren Hoch- und Tiefbau

Für den **Hochbau** wurde ein Bottom-up Materialflussmodell genutzt, welches die wesentlichen Komponenten der Gebäudekonstruktion[14] berücksichtigt, um die folgenden Maßnahmen zu modellieren:

[14] Fundament, tragende und nicht-tragende Wände, Boden, Fach

1. Reduktion der Wohn- und Büroraumin anspruchnahme
2. Wiederverwendung von Bauteilen
3. Verlängerte Lebensdauer von Gebäuden
4. Reduktion des Klinkerfaktors
5. Verwendung alternativer Bindemittel in der Zementherstellung
6. Nutzung alternativer, biobasierter, nachwachsender Materialsubstitute
7. Reduktion des Einsatzes von Baustahl und Strukturbeton durch Design
   a. Reduktion des Einsatzes von *Baustahl* durch Design (Verringerte Überspezifikation und Leichtbau)
   b. Reduktion des Einsatzes von *Strukturbeton* durch Design (Verringerte Überspezifikation und Leichtbau)
8. Wiederverwendung von Baustahl
9. Zementrecycling

Ein Teil dieser Maßnahmen ist für den **Tiefbau** nicht relevant, da diese sich auf Gebäude beziehen oder den erhöhten Sicherheitsanforderungen in Infrastruktur gegenüberstehen. Es verbleiben die folgenden Maßnahmen für den Tiefbau:

1. Verwendung v. Nebenprodukten u. Reststoffen aus d. Industrie u. Bauabfallzuschlägen
2. Reduktion des Einsatzes von Baustahl durch Design
3. Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design
4. Verwendung alternativer Bindemittel bei der Zementherstellung
5. Wiederverwendung von Baustahl
6. Zementrecycling mit der Smart Crusher-Technologie

Im Anhang (siehe 7.2.2) ist die Modellierungsreihenfolge dargestellt, der aufgrund der Interaktion der Maßnahmen (bspw. Geringere Sekundärmaterialverfügbarkeit bei rückläufigem Konsum) eine wesentliche Bedeutung bei der nachfolgenden Auswertung der Ergebnisse zukommt.

Szenarienvergleich

Hier wird zunächst für den Szenarienvergleich auf den Hochbau und Tiefbau getrennt geschaut, bevor im Anschluss daran die Einschätzung zu den Maßnahmen und ökologischen Wirkungskategorien für beide Sektoren gemeinsam getroffen wird.

<u>Szenarienvergleich Hochbau</u>

Für den Sektor **Hochbau** zeigt sich, dass alle betrachteten Wirkungskategorien im Baseline-Szenario 2045 niedriger sind als im Status quo. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass der Gebäudebestand in Deutschland weniger stark wächst, wodurch zum einen der Materialbedarf und zum anderen der Energieaufwand für die Gebäudenutzung abnimmt. Hinzu kommt der Energieträgerwechsel bei der Gebäudewärme, d.h. die Annahme, dass z.B. Gasheizungen (fossil) durch Wärmepumpen (nicht-fossil) ersetzt werden. Folglich reduzieren sich bspw. THG-Emissionen bereits um

14 % bzw. 53 Mt CO2-Äq, der Rohstoff-konsum um rund 45 % bzw. 153 Mt (RMC) und die Landnutzung um gut 19 % bzw. 1200 Tausend ha Land im Baseline-Szenario.

Trotz dieser Reduktion im Baseline-Szenario sind CE-Maßnahmen relevant für den Hochbau, da die verbleibenden Umweltwirkungen schwer zu vermeiden sind. Dies bezieht sich insbesondere auf die Herstellung des Baumaterials Zements, wo auch durch einen potenziellen zukünftigen Brennstoffwechsel die prozessbedingten Emissionen aus der Klinkerherstellung nicht vermieden werden können. Im Gegensatz hierzu haben die THG-Emissionen aus der Energieversorgung von Gebäuden nach der Umstellung auf eine treibhausgasneutrale Technologie einen deutlich geringeren Anteil.

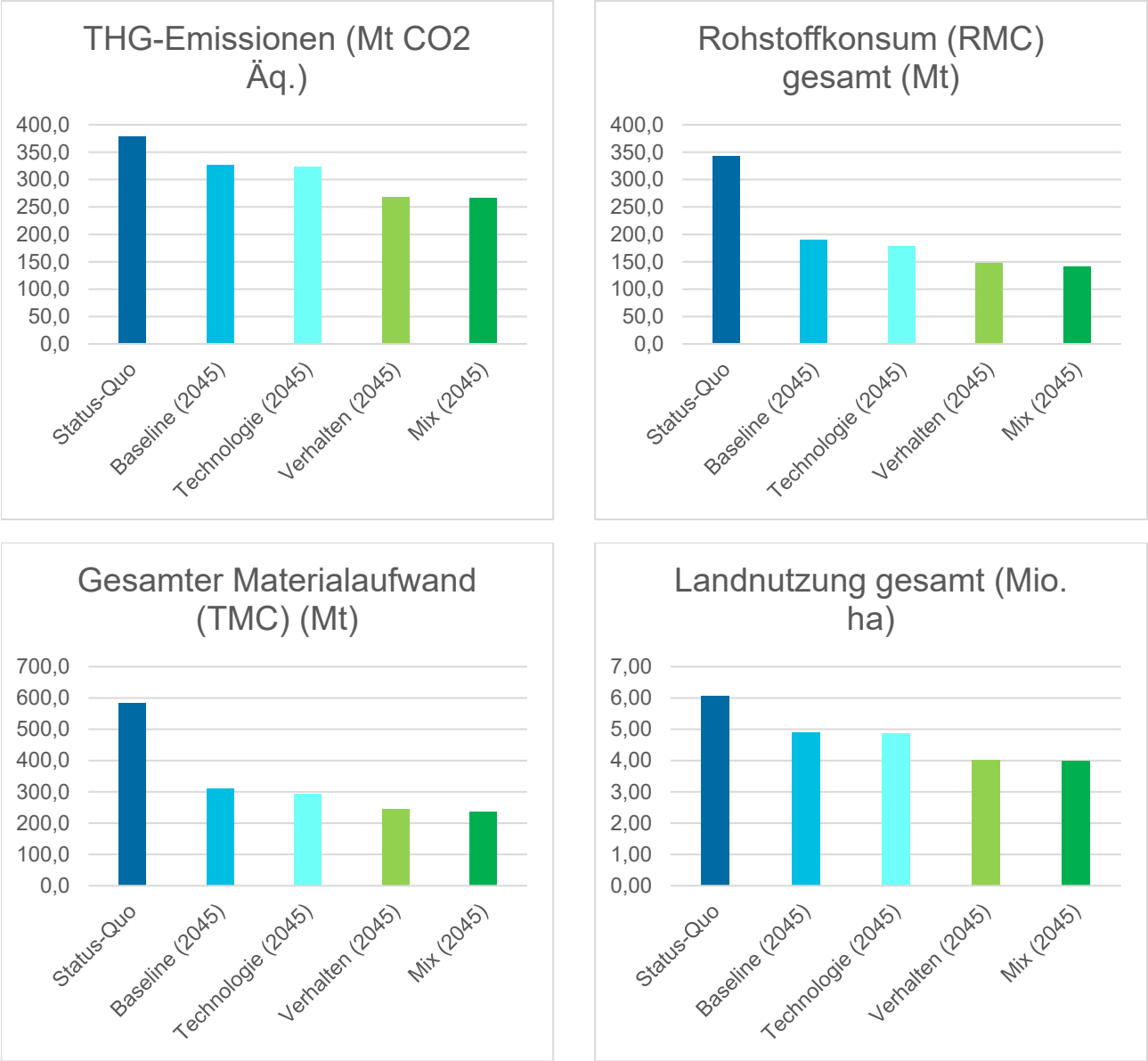
Gegenüber der Baseline hat das Mix-Szenario das größte Reduktionspotenzial, da alle Maßnahmen mit dem höchsten Ambitionsniveau umgesetzt werden. Die THG-Emissionen reduzieren sich um rund 18 %, Rohstoffkonsum und gesamter Materialaufwand um knapp 26 % bzw. 24 % und Landnutzung um ca. 18 %. Die THG-Emissionsreduktion beläuft sich folglich auf rund 60 Mt CO2-Äq gegenüber der Baseline. Die Maßnahme, die hierzu den größten Beitrag hat, ist die Reduktion der Wohn- und Büroraumininanspruchnahme mit rund 57 Mt CO2-Äq. Hier werden nicht nur Baumaterialien, sondern auch der Nutzenergiebedarf eingespart. Daraus ergibt sich ein THG-Emissionsreduktionspotenzial, welches rund 33-mal höher ist als die verbleibenden Maßnahmen in diesem Szenario kombiniert. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Reduktion der Rauminanspruchnahme die Neubauaktivität reduziert, sodass Maßnahmen wie die Reduktion des Materialeinsatzes durch Design oder der Einsatz von Materialsubstituten geringere Auswirkungen haben. Zudem ist dadurch langfristig (nach 2045) weniger Sekundärmaterial verfügbar. Beim Rohstoffkonsum bietet an zweiter Stelle die verlängerte Lebensdauer von Gebäuden die größten Einsparungen, gefolgt von der Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design. Folglich haben Maßnahmen, welche die Neubauaktivität reduzieren, den größten Hebel. Hierbei hat die Reduktion der Rauminanspruchnahme ein deutlich größeres Potenzial als die Verlängerung der Lebensdauer bestehender Gebäude.

Daraus folgt, dass das **Verhalten-Szenario** nach dem Mix-Szenario das größte Reduktionspotenzial hat, da die Reduktion der Wohn- und Büroraumininanspruchnahme im Technologie-Szenario nicht umgesetzt wird. Da in diesem Szenario Maßnahmen mit Technologie-Fokus nicht umgesetzt werden, ist der Beitrag dieser Maßnahme zur THG-Emissionsreduktion sogar rund 51-mal höher als der kombinierten verbleibenden Maßnahmen. In diesem Szenario hat die verlängerte Lebensdauer wiederum den zweitgrößten Beitrag zur Reduktion des Rohstoffkonsums gegenüber der Baseline. Die Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design wird in diesem Szenario nicht umgesetzt. Analog zum Mix-Szenario liegen die Reduktion der THG-Emissionen bei rund 18 %, des Rohstoffkonsums und Gesamten Materialaufwands bei ca. 22 % bzw. 21 % und der Landnutzung bei knapp 18 %.

Die Reduktion im **Technologie-Szenario** ist dementsprechend am niedrigsten, obwohl wesentliche Mengen Baumaterial eingespart werden. Zudem wird aus diesem Szenario ersichtlich, welchen Beitrag zur THG-Emissionsreduktion der Einsatz von Materialsubstituten in der Klinker- und Zementherstellung sowie die Reduktion des Materialeinsatzes durch Design haben kann, wenn keine Reduktion der Rauminanspruchnahme umgesetzt wird. Die Reduktionspotenziale sind zwischen rund 1,3- und 1,5-mal höher als im Mix-Szenario. Dementsprechend weicht hier das Verhältnis der Wirkungskategorien zueinander ab. Während sich die THG-Emissionen und Landnutzung mit rund 15 % bzw. 20 % Reduktion gegenüber dem Status quo kaum zum Baseline-Szenario unterscheiden, ist die Reduktion von RMC und TMC mit rund 48 % bzw. 49 % etwas höher. Hierzu trägt hauptsächlich die Reduktion von Strukturbeton durch Design bei, da hierdurch im Schnitt etwa 12 % Material eingespart werden kann. Im Gegensatz dazu hat die Wiederverwendung von Bauteilen einen relativ geringen Beitrag, da aufgrund der fehlenden Standardisierung davon ausgegangen wird, dass nur

rund 19 % der Bauteile wiederverwendet werden können. Mit zunehmender Standardisierung kann das Potenzial dieser Maßnahme langfristig (nach 2045) zunehmen.

Abbildung 4-26: Vergleich der Szenarien – *Hochbau*



Quelle: Eigene Darstellung.

Szenarienvergleich Tiefbau

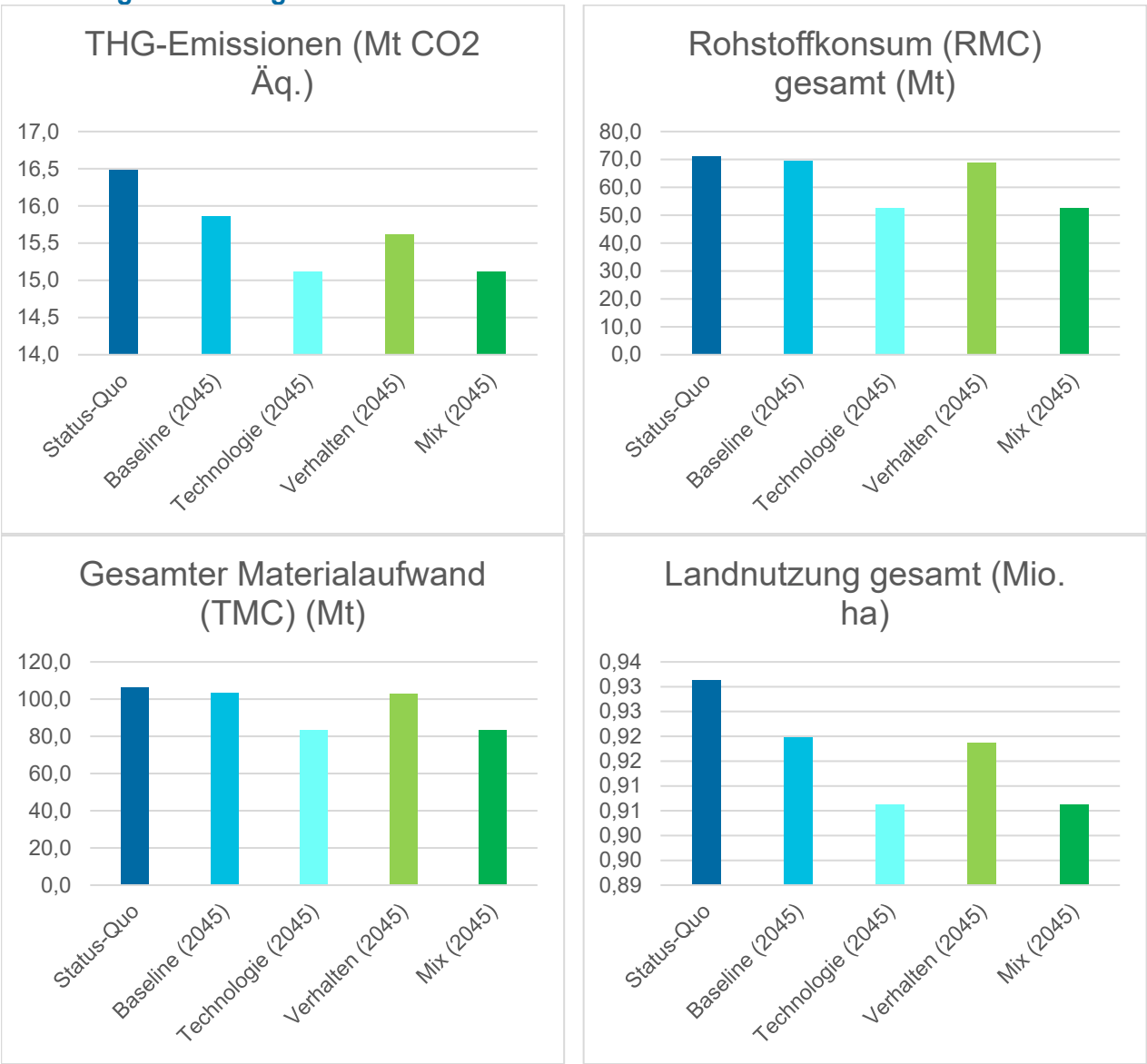
Auch im Tiefbau-Sektor zeigt sich, dass alle Wirkungskategorien im **Baseline-Szenario gegenüber dem Status quo** sinken. Im Gegensatz zum Hochbau ist dies jedoch deutlich weniger ausgeprägt. So tritt im Tiefbau ebenfalls eine Reduktion der Materialnachfrage aufgrund einer geringeren Änderung des Infrastrukturbestandes ein. Die THG-Emissionen reduzieren sich folglich gegenüber dem Status quo um rund 4 % bzw. 0,6 Mt CO2-Äq, um 3 % oder 1 800 Kilo-Tonnen (RMC) und 1 % bzw. 11,6 Tausend ha Land.

CE-Maßnahmen können im Tiefbau dazu beitragen die verbleibenden Umweltwirkungen weiter zu reduzieren und insbesondere die für den Hochbau beschriebenen prozessbedingten Emissionen zu

vermeiden. Dies ist besonders relevant, da THG-Emissionen aus Nutzenergieversorgung für Infrastruktur i.d.R. keine Rolle spielen.

Aufgrund der einleitend dargestellten Maßnahmenauswahl sowie der in 9.3.2 beschriebenen Szenario-Zuordnung sind für den Tiefbau-Sektor die Szenarien **Mix** und **Technologie** identisch. In diesen Szenarien reduzieren sich die THG-Emissionen um rund 5 %, der Rohstoffkonsum um rund 24 % und der Gesamt-Materialaufwand um rund 19 % gegenüber der Baseline. Die Landnutzung wird um rund 1 % gegenüber dem Baseline-Szenario reduziert.

Abbildung 4-27: Vergleich der Szenarien – *Tiefbau*



Quelle: Eigene Darstellung.

Die Reduktion im **Verhalten-Szenario** ist deutlich niedriger, da ein Großteil der Maßnahmen für den Tiefbau diesem Szenario nur in schwacher Ausprägung zuzuordnen ist. Die verhaltensbasierten Maßnahmen aus dem Hochbau adressieren ausschließlich Gebäude und sind hier daher nicht berücksichtigt. So werden die THG-Emissionen nur um rund 2 % gegenüber der Baseline reduziert. Dies spiegelt sich auch in der jeweiligen Reduktion des Rohstoffkonsums und des Gesamten Materialaufwands um 1 % bzw. 1 % wider. Für Landnutzung liegen die Werte darunter bei rund 0,1 %.

Maßnahmenvergleich

Für beide Sektoren muss zunächst gesagt werden, dass die Effekte der Maßnahmen von der Reihenfolge der Modellierung dieser abhängen. Beispielsweise gilt für den Hochbau, dass die Reduktion der Wohn- und Bürorauminanspruchnahme und die Lebensdauerverlängerung das erreichbare Potenzial der folgenden Maßnahmen, wie bspw. der Reduktion des Materialeinsatzes durch Design oder die Wiederverwendung von Bauteilen, auf die verbleibende Neubauaktivität bzw. die im Bestand befindlichen Gebäude reduziert. Diese Überlegung würde auch andersherum gelten, entschieden wurde jedoch für eine Reihenfolge in Anlehnung an die Hierarchie der R-Strategien.

Der Hochbau macht im Vergleich mit dem Tiefbau den überwiegenden Teil der THG-Emissionen, Ressourceninanspruchname und Landnutzung aus dem gesamten Bau aus. Das Reduktionspotenzial im Tiefbausektor ist darüber hinaus aufgrund von Sicherheitseinschränkungen sowie Auftraggeber*innenstruktur begrenzt, da davon ausgegangen wird, dass öffentliche Auftraggeber*innen bereits möglichst kosten- und somit materialeffizient arbeiten (siehe Abschnitt 7.2.2, Modellierungsdaten und Annahmen).

- Für **THG-Emissionen** liegt dies insbesondere daran, dass die Nutzung der Gebäude, also die durch die Erzeugung der Gebäudewärme entstehenden Emissionen, in der Modellierung enthalten ist (auch in anderen Sektoren wie Beleuchtung). Im Status quo liegt die Verteilung bei 96 % verursacht durch den Hochbau und 4 % durch den Tiefbau. Dies ändert sich auch in der Baseline für 2045 nur wenig. Dann liegt der Hochbau bei 95 % und der Tiefbau bei 5 %. Entsprechend liegen die erzielten Gesamtreduktionen durch die Maßnahmen des ambitionierten Mix-Szenarios in absoluten Werten bei 59,2 Mt CO_2-Äq für den Hochbau und 0,8 Mt CO_2-Äq für den Tiefbau. Relativ gesehen sind das Reduktionen von 18 % beziehungsweise 5 % gegenüber dem Baseline-Szenario.
- Die Balance der beiden Teilbereiche ist bei der **Ressourceninanspruchnahme** jedoch deutlich ausgeglichener als bei den Emissionen, da der Tiefbau sehr ressourcenintensiv ist. Im Status quo liegt die Verteilung bei 83 % des Ressourcenkonsums verursacht durch den Hochbau und 17 % durch den Tiefbau. Für den Gesamten Materialaufwand liegt das Verhältnis bei 85 % Hochbau und 15 % Tiefbau. In der Baseline für 2045 liegt der Hochbau bei 73 % und der Tiefbau bei 27 % des Ressourcenkonsums, bzw. 75 % für den Hochbau und 25 % für den Tiefbau beim Gesamten Materialaufwand. Die erzielten Gesamtreduktionen durch die Maßnahmen des ambitionierten Mix-Szenarios liegen in absoluten Werten bei 49,1 Mt Minderung des Ressourcenkonsums für den Hochbau und 16,9 Mt für den Tiefbau, bzw. 75,2 Mt des Gesamten Materialaufwands beim Hochbau und 20,1 Mt beim Tiefbau. Relativ gesehen ergeben sich Reduktionen von 26 % beziehungsweise 24 % des Ressourcenkonsums und 24 % bzw. 19 % des Gesamten Materialaufwands gegenüber dem Baseline-Szenario.
- Bei der **Landnutzung** liegt im Status quo die Verteilung bei 87 % verursacht durch den Hochbau und 13 % durch den Tiefbau. Dies ändert sich auch in der Baseline für 2045 nur wenig. Dann liegt der Hochbau bei 84 % und der Tiefbau bei 16 %. Entsprechend liegen die erzielten Gesamtreduktionen durch die Maßnahmen des ambitionierten Mix-Szenarios in absoluten Werten bei 907 Tausend Hektar für den Hochbau und 13,4 Tausend Hektar für den Tiefbau. Relativ gesehen ergeben sich Reduktionen von 18 % beziehungsweise 1 % gegenüber dem Baseline-Szenario.

Hervorgerufen wird diese Änderung durch eine Reduktion des Bedarfs an neuen Gebäudeflächen bzw. eine geringere Neubauquote aufgrund einer Sättigung des Gebäudebestands. Dies zeigt sich insbesondere für Einfamilien-, Mehrfamilien- und Bürogebäude, ist jedoch auch bei den restlichen Gebäudetypen sichtbar. Gründe sind der demographische Wandel sowie bereit formulierte politische Ziele. In der Konsequenz bietet der Hochbau ein größeres Potenzial für Umweltentlastung der Tiefbau.

Im **Hochbau** ist die alles überwiegende Maßnahme die Reduktion der Wohn- und Büroraumin-anspruchnahme (1) mit 57,5 Mt CO_2-Äq, 34,1 Mt Einsparung im Ressourcenkonsum, 55,6 Mt im Gesamten Rohstoffaufwand und einer Einsparung von 872 Tausend Hektar in der Landnutzung. Die verlängerte Lebensdauer von Gebäuden (3) reduziert die THG-Emissionen zwar nur um rund 0,4 Mt CO_2-Äq, 5,5 Mt Einsparung im Ressourcenkonsum, 6,8 Mt im Gesamten Rohstoffaufwand und einer Einsparung von 10 Tausend Hektar in der Landnutzung, hat aber einen vergleichbaren Wirkmechanismus zur Reduktion der Rauminanspruchnahme, da die Neubauaktivität reduziert wird. Hier ist zu bedenken, dass die Wirkungen der weiteren Maßnahmen vergleichsweise gering ausfallen, da bei der Reduktion der Rauminanspruchnahme auch die Reduktion der Nutzenergie berücksichtigt wird. Zusätzlich ist der Beitrag der weiteren Maßnahmen größer, wenn diese separat betrachtet werden, da die Maßnahmeninteraktion wesentlichen Einfluss hat. So ergeben sich aufgrund der reduzierten Rauminanspruchnahme, aber auch durch die verlängerte Lebensdauer geringere Potenziale bspw. für den Einsatz von Materialsubstituten oder für die Wiederverwendung und das Recycling. Dennoch können Maßnahmen, die auf emissionsreduziertes Bauen abzielen nie die Minderung einer reduzierten Neubauaktivität erzielen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Potenziale für eine Flächenreduktion begrenzt sind, daher wurde in den Szenarien keine Reduktion, sondern eine Stagnation der Pro-Kopf-Flächen auf dem Status quo-Niveau berücksichtigt (45 m^2 /Kopf entsprechend des Projektionsberichts 2021 nach (Repenning et al. 2021)). Neben den beiden genannten Maßnahmen, welche die Neubauaktivität reduzieren, sind es insbesondere die Reduktion der Klinkerfaktors (4) und die Reduktion des Baustahl- und Strukturbetoneinsatzes durch Design (7a und b), welche zu einer Reduktion der THG-Emissionen beitragen. Der Beitrag der Maßnahmen, welche auf die Zirkulation von Produkten und Materialien abzielen, wie die Wiederverwendung von Bauteilen (2), die Wiederverwendung von Baustahl (8) und das Zementrecycling (9) sind aufgrund der geringen technischen Potenziale begrenzt (siehe Abschnitt 7.2.2, Modellierungsdaten und Annahmen). Auch die Substitution von Zement durch innovative Bindemittel (5) oder durch den Holzbau (6) ist aufgrund der limitierten Verfügbarkeit und der hohen Kosten der Substitute eingeschränkt.

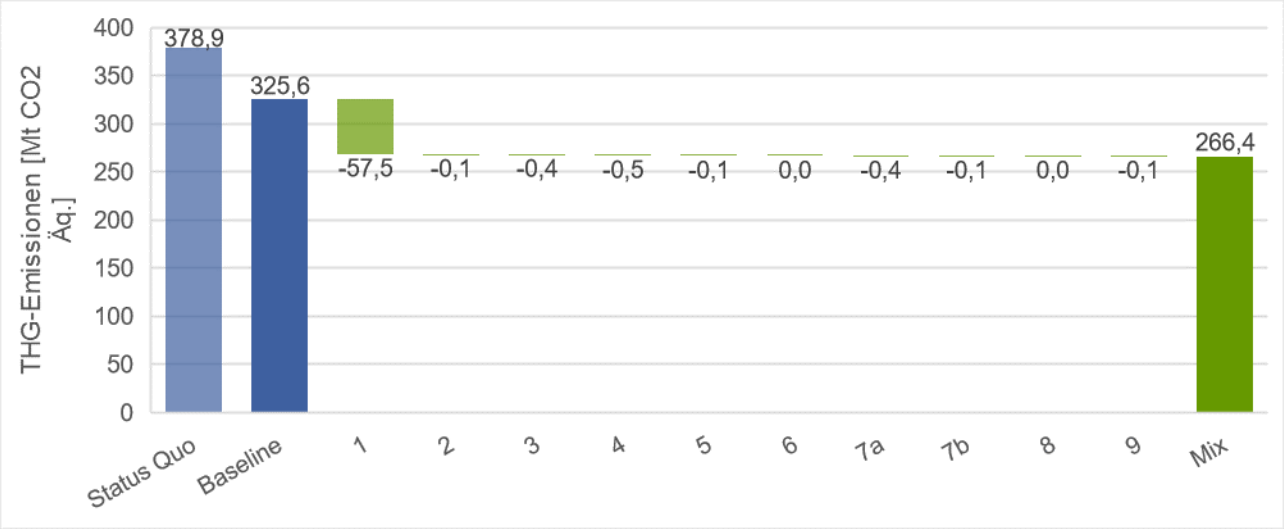
Im **Tiefbau** sind

- die Emissionseinsparungen relativ gleichmäßig über die einzelnen Maßnahmen verteilt, wobei das Zementrecycling (6) mit rund 0,24 Mt CO_2-Äq Reduktion den größten Anteil hat. Gefolgt wird diese Maßnahme von der Reduktion des Klinkerfaktors (1) sowie dem Einsatz alternativer Bindemittel (4). Die wesentliche Maßnahme zur Emissionsreduktion aus dem Hochbau, die reduzierte Rauminanspruchnahme, kommt in diesem Sektor nicht zum Tragen.
- die Ressourceneinsparungen der Maßnahme 6 zum Zementrecycling besonders signifikant. Hierdurch können 13,7 Mt des Ressourcenkonsums bzw. 15,9 Mt des Gesamten Rohstoffaufwands eingespart werden. Gefolgt wird diese Maßnahme durch die Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton (3) durch Design mit rund 2,4 Mt (RMC) und 2,9 Mt (TMC).
- die Reduktion der Verwendung von Baustahl durch neue Designkonzepte (2) sowie das Zementrecycling (6) die mit 5,2 und 4,5 Tausend Hektar die größten Einsparungen erzielen können.

Erst die Kombination der Maßnahmen erreicht hier eine signifikante Reduktion der Emissionen, da die Reduktionspotenziale der Einzelmaßnahmen, wie einleitend beschrieben, begrenzt sind.

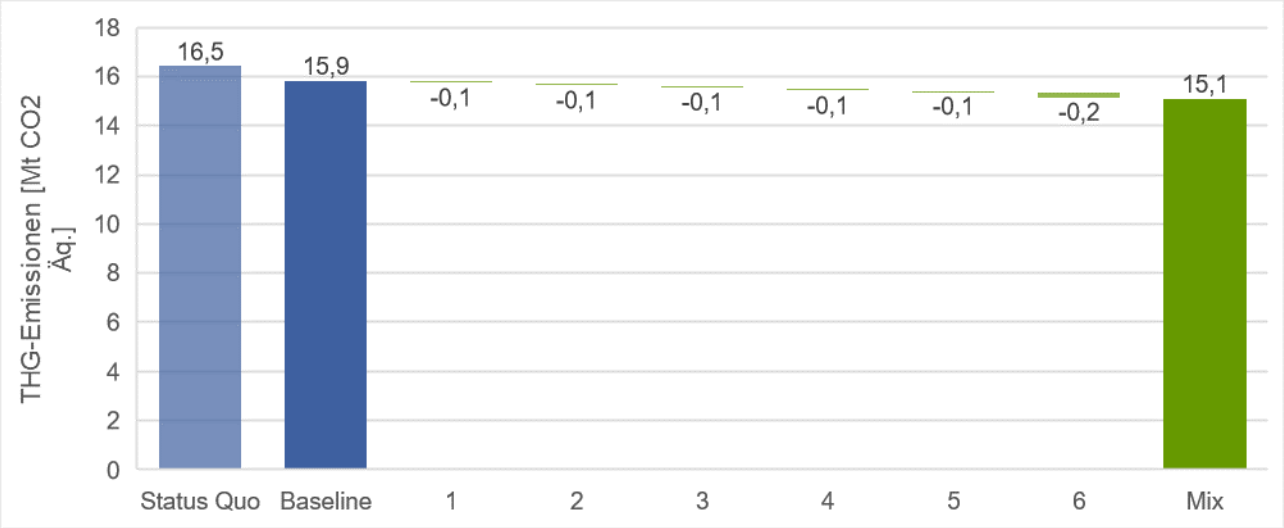
Treibhausgasemissionen

Abbildung 4-28: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Hochbau*



Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung voneinander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

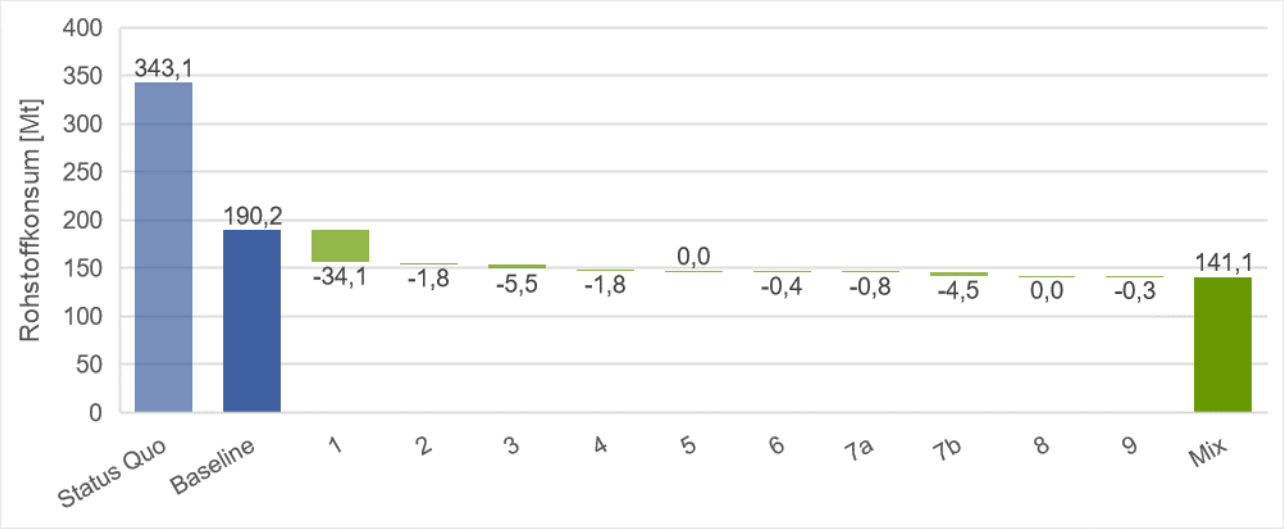
Abbildung 4-29: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Tiefbau*



Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung voneinander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

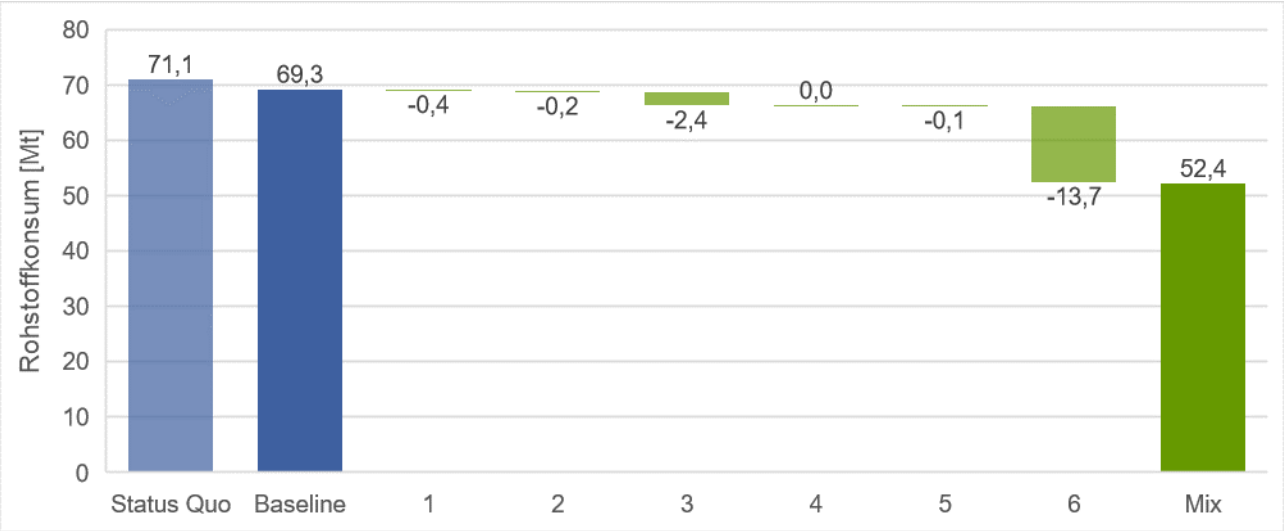
Ressourceninanspruchnahme

Abbildung 4-30: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Hochbau*



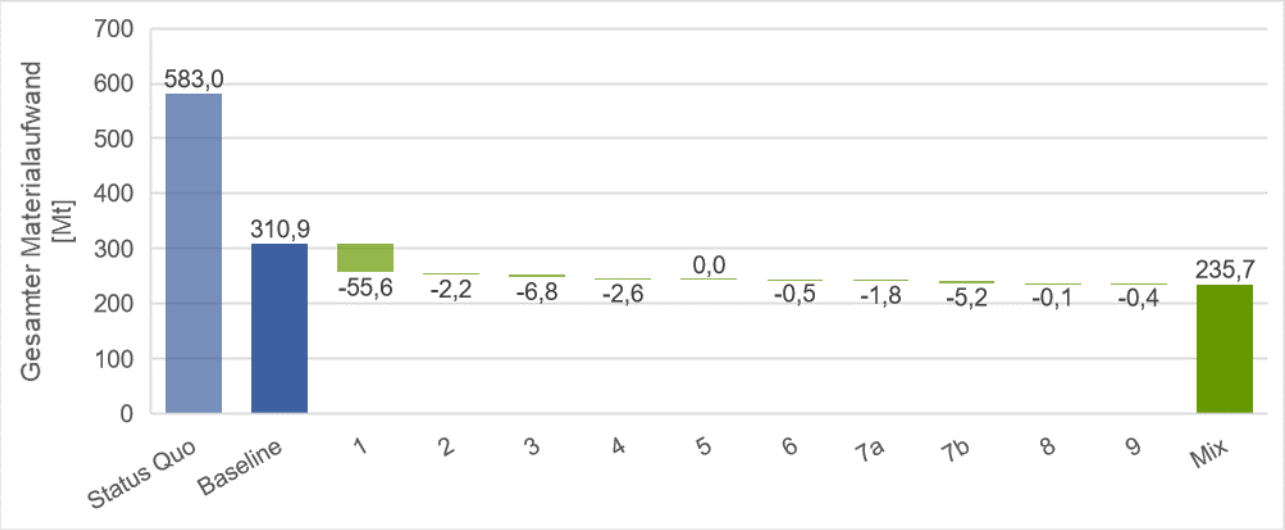
Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung von einander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-31: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Tiefbau*



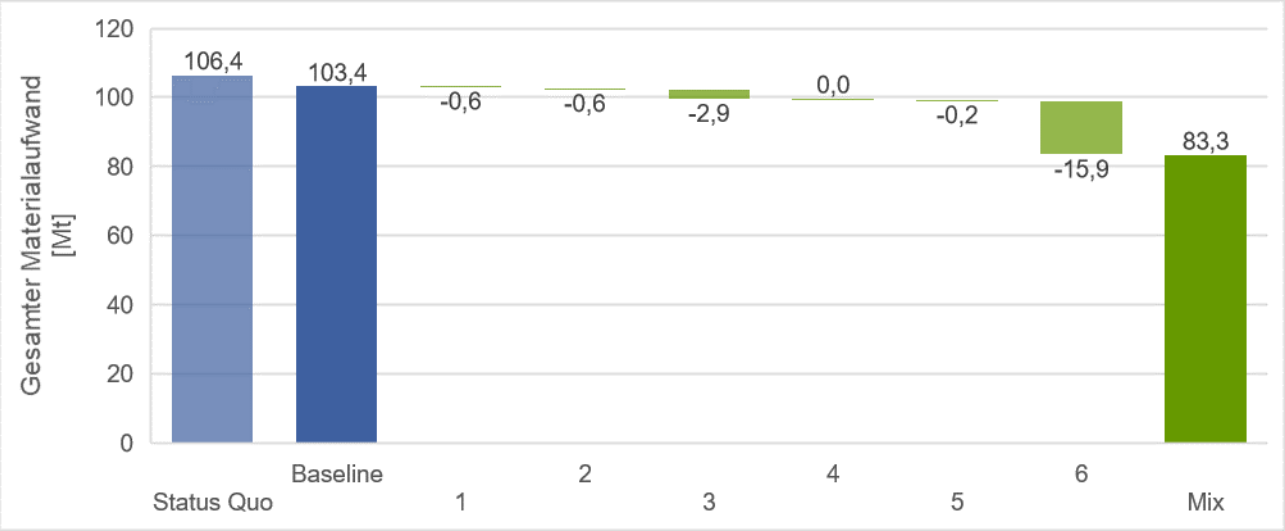
Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung von einander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-32: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Hochbau*



Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung von einander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

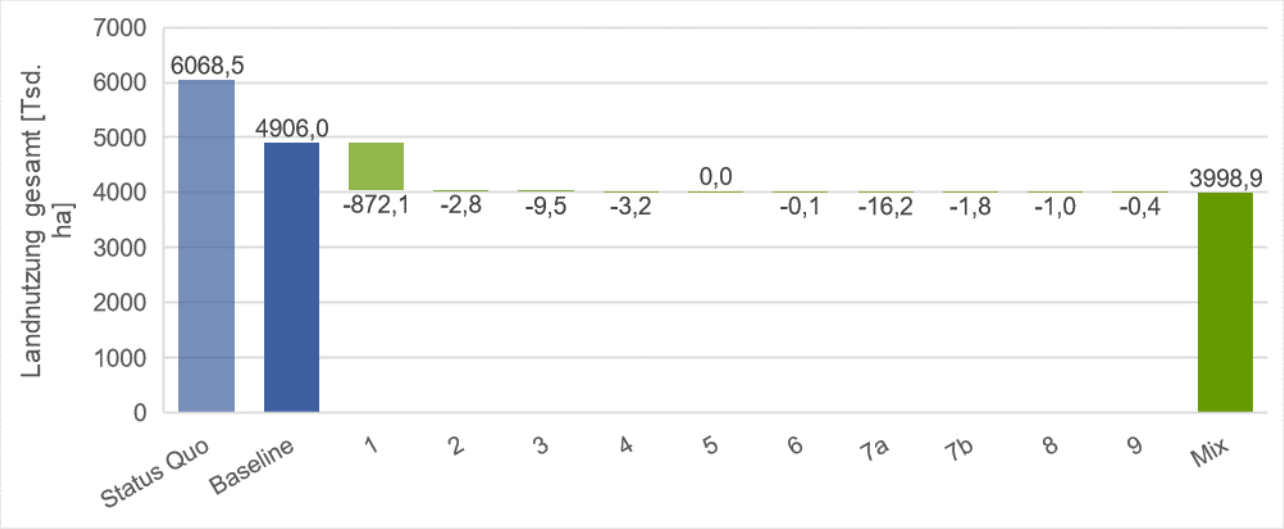
Abbildung 4-33: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Tiefbau*



Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung von einander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

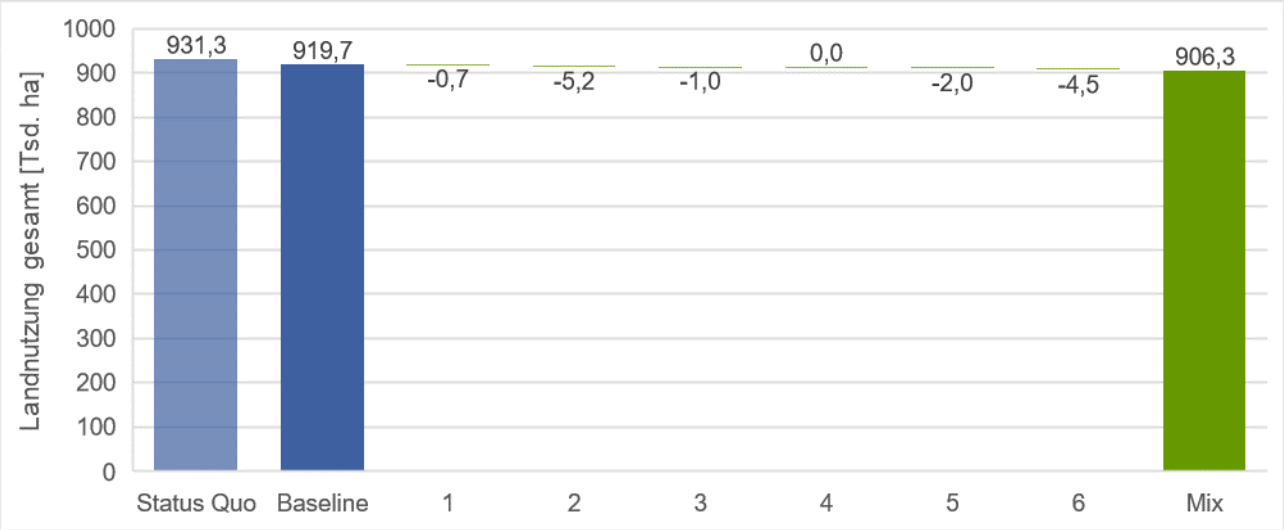
Landnutzung

Abbildung 4-34: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Hochbau*



Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung von einander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-35: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Tiefbau*



Hinweis: Die Maßnahmen sind im Bausektor sind abhängig in ihrer Wirkung von einander und von der Reihenfolge der Umsetzung.
Quelle: Eigene Darstellung.

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Die zuvor dargestellten Ergebnisse beruhen auf einer Materialflussmodellierung für Stahl und Zement im Hoch- und Tiefbau. Diese Materialien sind aufgrund der hohen Energie- und Emissionsintensität für Umweltwirkungen, insbesondere für THG-Emissionen, vor dem Hintergrund der Dekarbonisierung von besonderer Relevanz. Die Ergebnisse der Materialflussmodellierung sowie eine zusätzliche vereinfachte Abschätzung des Nutzenergiebedarfs in Gebäuden wurden als Input für die Berechnungen im MRIO-Ansatz genutzt. Die mit dem MRIO-Ansatz berechneten Indikatoren (THG-

Emissionen, RMC, TMC, Landnutzung) bilden den Gesamtsektor ab. Änderungen dieser Indikatoren gegenüber dem Status Quo sind auf Änderungen bei der Stahl- und Zementnachfrage sowie eine vereinfachte Abschätzung der Nutzenergie rückzuführen.

Im Gegensatz zu den anderen betrachteten Sektoren erfolgte für den Hochbau eine detaillierte Bottom-up-Betrachtung von unterschiedlichen Gebäudetypen anhand der Gebäudebestandsentwicklung des Projektionsberichts. Diese wurde um eine vereinfachte Betrachtung des Tiefbausektor vergleichbar zu den anderen Sektoren, die in diesem Bericht betrachtet werden, ergänzt. Eine detaillierte Bottom-up-Betrachtung des Tiefbaus war im Rahmen der Forschungsvorhaben aus Gründen der Datenverfügbarkeit nicht möglich. Diese limitierte Datenverfügbarkeit hat auch die top-down Modellierung des Tiefbausektors beeinflusst. Daher sind die Ergebnisse für den Tiefbau im Gegensatz zum Hochbau als gröbere Abschätzungen zu verstehen (siehe auch Anhang für weitere Informationen zu den Materialflussmodellen).

Die hier dargestellten Potenziale hängen maßgeblich von der Parametrisierung der CE-Maßnahmen in der Materialflussmodellierung ab. So hat aufgrund der getroffenen Annahmen die Reduktion der Wohn- und Büroraumflächeninanspruchnahme gegenüber der Baseline den größten Einfluss auf alle Indikatoren. Die zugrundeliegende Annahme der Stagnation der Pro-Kopf-Flächen ist zwar in Interviews abgestimmt worden, jedoch aufgrund der Gegenläufigkeit zu aktuellen Trends mit Unsicherheit behaftet. Diese Maßnahme wurde außerdem um eine Abschätzung der Reduktion der Nutzenergie ergänzt. Da dieser Abschätzung jedoch keine detaillierte Modellierung des Gebäudebestands unterliegt, ist diese mit einer hohen Unsicherheit verbunden.

Dem gegenüber stehen die vorwiegend technischen Maßnahmen wie Materialsubstitution, Materialeffizienz und Recycling. Hier liegt die Unsicherheit nicht in den tatsächlichen Potenzialen, sondern in der Frage, ob der Markt auf die alternativen Materialien setzt und diese zu großen Anteilen nutzt. Die hier berücksichtigten Annahmen und Begründungen sind auch ausführlich im Anhang dargestellt.

Die Auswahl der betrachteten CE-Maßnahmen erfolgt anhand der Vorstudie sowie der Interviews basierend auf ihren potenziellen Auswirkungen. Folglich wurden einzelne Nischen-Technologien aufgrund ihrer geringen Bedeutung für die Gesamtszenarien sowie der herausfordernden Abschätzung ihrer Auswirkungen nicht berücksichtigt (siehe auch Anhang). Dies ist beispielsweise die Materialsubstitution im Tiefbau. Ein Beispiel hierfür ist in untenstehender Textbox beschrieben.

Vergleichbare Studien für Deutschland sind aktuell nicht verfügbar, jedoch gibt es zwischenzeitlich eine Vielzahl internationaler Studien, welche die Potenziale einer CE im Bausektor abschätzen. Diese fokussieren jedoch auf den Hochbau bzw. teils sogar ausschließlich auf den Wohnungsbau. In diesen Studien werden grundsätzlich vergleichbare Maßnahmen wie die hier betrachteten genannt, was die getroffene Auswahl an Maßnahmen bestätigt. Auch das nennenswerte Potenzial einer Flächenreduktion wird insbesondere auch durch Hertwich et al. (2020) genannt. Die Potenziale der weiteren Maßnahmen variieren stark zwischen den einzelnen Studien und hängen somit auch wie in den hier dargestellten Analysen von der Parametrisierung der Maßnahmen ab. So hat zwar ähnlich zur vorliegenden Analyse das materialeffiziente Design von Gebäuden eine relevante Wirkung in den genannten Studien, jedoch ist beispielsweise die verlängerte Lebensdauer von Gebäuden deutlich niedriger eingeschätzt. Dies kann auf internationale Unterschiede beim Neubau und Abriss von Gebäuden rückzuführen sein. Außerdem wird die Reduktion des Klinkerfaktors und der Einsatz innovativer Bindemittel in den genannten Studien nicht berücksichtigt (Material Economics 2018; Circle Economy 2022; Hertwich et al. 2020).

4.1.2.3 IKT und Haushaltsgeräte

CE-Maßnahmen in den Sektoren IKT und Haushaltsgeräte

In den Sektoren IKT und Haushaltsgeräte wurden folgende CE-Maßnahmen im Hinblick auf deren ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzungen modelliert:

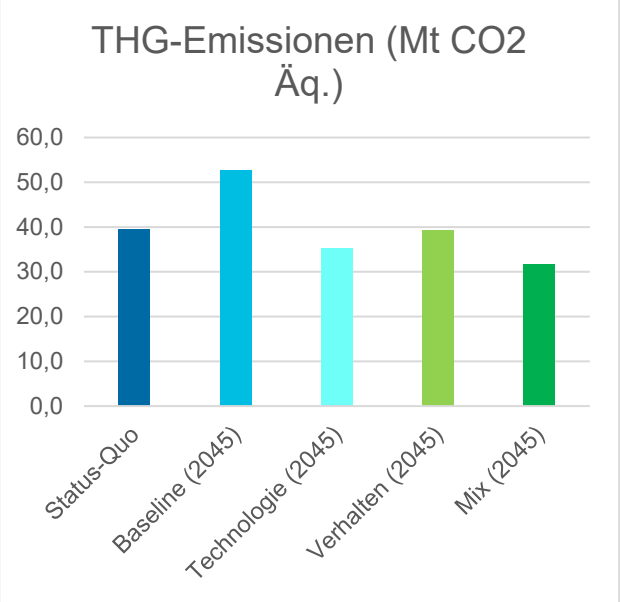
1. Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Geräten
2. Remanufacturing
3. Verbesserte Sammlung und erhöhte Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten
4. Ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren

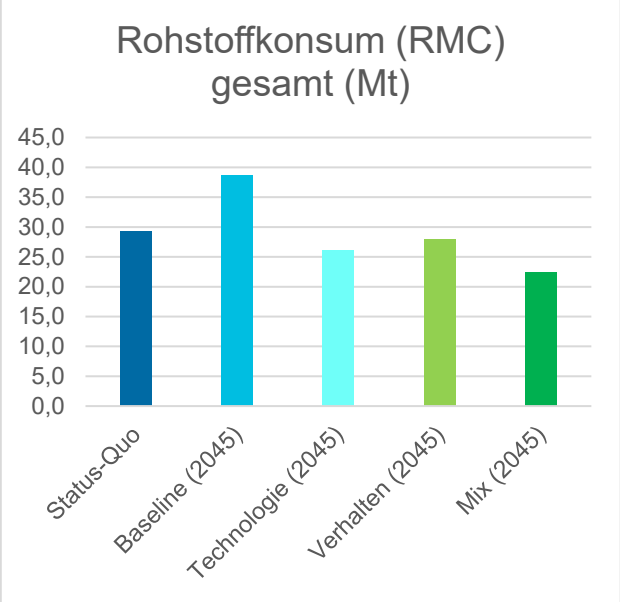
Die Maßnahmen wurden für folgende Geräte modelliert: Smartphones, Tablets, Notebooks, Desktop-PCs, TV-Geräte, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Kühl- und Gefriergeräte und Geschirrspüler. Eine Beschreibung der Maßnahmen und deren Modellierung sowie Ausprägung in den Szenarien befinden sich im Anhang (7.2.3). Zentrale Daten und Annahmen für die Modellierung sind ebenfalls im Anhang (7.2.3) zusammenfassend dargestellt.

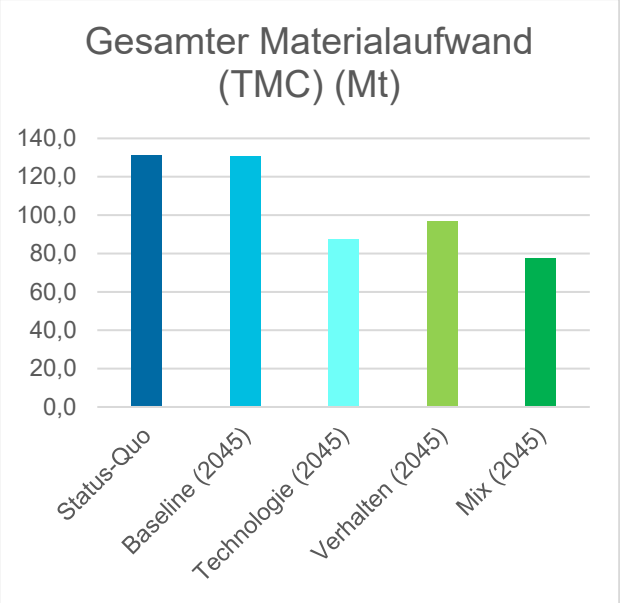
Szenarienvergleich

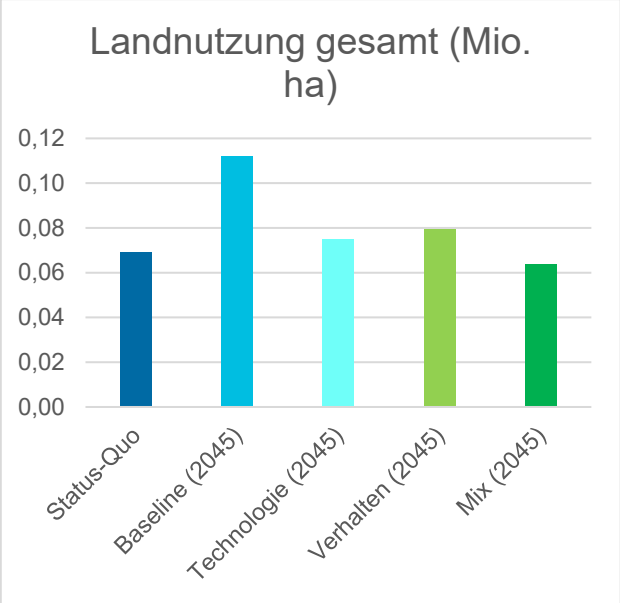
Ohne CE-Maßnahmen würden die Umweltauswirkungen zwischen Status quo und Baseline im Jahr 2045 substanziell zunehmen. Bei THG-Emissionen würden die Emissionen im Jahr 2045 um 34 % oder 13,3 Mt CO_2-Äq zunehmen, wenn keine CE-Maßnahmen im Bereich IKT und Haushaltsgeräte umgesetzt werden. Beim RMC käme es ohne CE-Maßnahmen zu einem Anstieg von 9,4 Mt (32 %) und bei der Landnutzung von 0,04 Mha (62 %) im Jahr 2045.

Abbildung 4-36: Vergleich der Szenarien – *IKT und Haushaltsgeräte*









Quelle: Eigene Darstellung.

Im Vergleich zum Baseline-Szenario führen die im Rahmen dieser Studie modellierten CE-Maßnahmen zu einer Reduktion der THG-Emissionen um 40 %, des Rohstoffkonsums (RMC) um 42 % und der Landnutzung um 43 % im **Mix-Szenario** im Jahr 2045. Die Reduktionen entsprechen Einsparungen von 21,1 Mt CO_2-Äq, 16,3 Mt RMC und 0,05 Mha Land im Jahr 2045.

Das **Technologie-Szenario** hat das zweithöchste Einsparpotenzial. Das Technologie-Szenario hat ein höheres Entlastungspotenzial als das Verhalten-Szenario, da hier die ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren viel stärker ausgeprägt ist. Das Umweltentlastungspotenzial im Technologie-Szenario ergibt Reduktionen der THG-Emissionen, des RMC und der Landnutzung um jeweils 33 % im Jahr 2045.

Im **Verhalten-Szenario** gehen die negativen Umweltauswirkungen aufgrund von CE-Maßnahmen um 28 % bei THG-Emissionen, um 28 % beim RMC und um 29 % bei der Landnutzung zurück. Im Verhalten-Szenario spielt die Maßnahme zur Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Endgeräten eine größere Rolle als im Technologie-Szenario.

Maßnahmenvergleich

Auf der Ebene der Maßnahmen ergeben sich die höchsten Umweltentlastungspotenziale durch die ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren (Maßnahme 4). Diese Maßnahme trägt, je nach Umweltkategorie, zwischen 62 % (Landnutzung) und 73 % (Treibhausgasemissionen) zum Gesamtumweltentlastungspotenzial der CE-Maßnahmen im Mix-Szenario im Vergleich zum Baseline im Jahr 2045 bei. Die hohen Umweltentlastungspotenziale durch die ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren sind auf zwei wesentliche Faktoren zurückzuführen: (1) Verringerung des Marktwachstums der Serverzahlen, und (2) Steigerung der Energieeffizienz in der Nutzung. Eine Verringerung des Marktwachstums bei Serverzahlen wird dadurch erreicht, dass die IT-Technik insgesamt ressourceneffizient eingesetzt wird, z.B. durch die Verbesserung der IT-Last, höhere Konsolidierungs- und Virtualisierung der IT-Technik usw. Dadurch werden insgesamt weniger Server benötigt, was den Herstellungsaufwand der IT-Technik verringert. Zusätzlich spielen Energieeffizienzmaßnahmen, die zur Senkung des durchschnittlichen Power Usage Effectiveness (PUE) führen, wie z.B. energieeffiziente Klimatechnik, Erhöhung der Serverraumtemperatur usw., eine wichtige Rolle. Viel wichtiger ist allerdings der Bezug des Stroms aus regenerativen Energiequellen für den Betrieb. Der

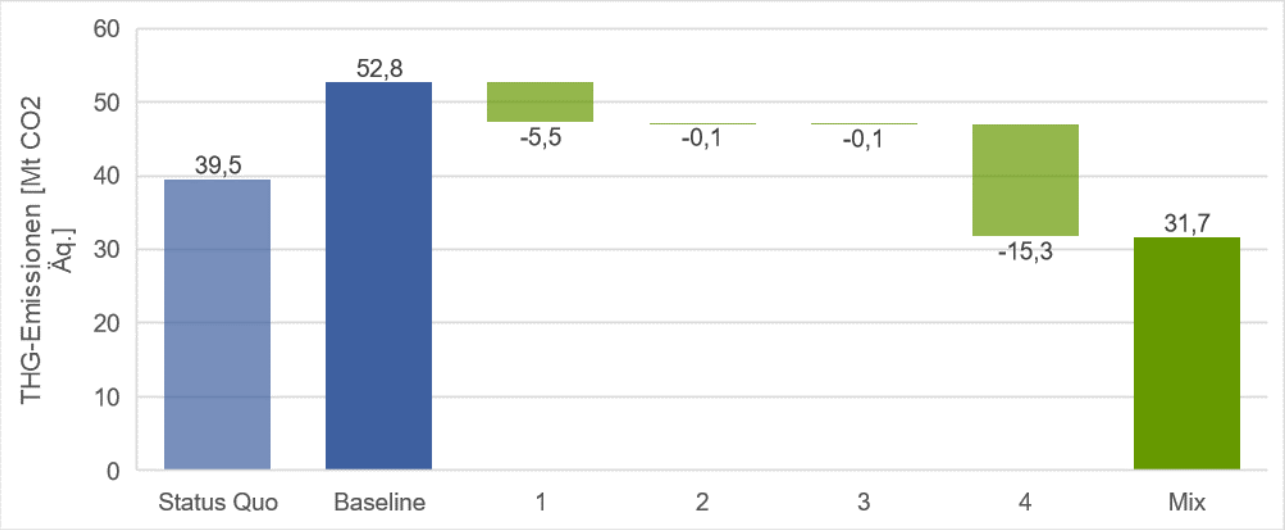
Anstieg des Anteils regenerativer Stromerzeugung in Deutschland führt zu einer erheblichen Reduktion der Treibhausgasemissionen beim Betrieb der Rechenzentren.

Auf der Ebene von Endgeräten tragen die CE-Maßnahmen zur Lebens- und Nutzungsdauer (Maßnahme 1) wesentlich zur Umweltentlastung bei. Bei Treibhausgasemissionen liegt der Beitrag dieser Maßnahmen bei knapp 26 % an Gesamteinsparungen im Mix-Szenario; beim RMC bei ca. 31 % und bei der Landnutzung bei 35 %. Bei allen modellieren Geräten wog der hohe Herstellungsaufwand schwerer im Vergleich zu Energieeffizienzsteigerungen in der Nutzungsphase. In anderen Wörtern wird der hohe Herstellungsaufwand durch die Energieeinsparung in der Nutzung nicht amortisiert. Das bedeutet, dass die Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Endgeräten in den meisten Fällen sinnvoll ist, auch unter Berücksichtigung des Umweltaufwandes für die Herstellung der Ersatzteile.

Die Umweltentlastungspotenziale bei anderen CE-Maßnahmen, nämlich Remanufacturing (Maßnahme 2) und Verbesserte Sammlung und erhöhte Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten (Maßnahme 3) sind vergleichsweise gering. Bei Treibhausgasemissionen führt Remanufacturing zu einer jährlichen Einsparung von 0,15 Mt CO_2-Äq im Jahr 2045. Durch die verbesserte Sammlung von Endgeräten und Rückgewinnung von Rohstoffen in den betrachteten IKT- und Haushaltsgeräten kommt es zu einer jährlichen Einsparung von ca.0,07 Mt CO_2-Äq im Jahr 2045. Nichtsdestotrotz leisten die genannten zwei CE-Maßnahmen zusammen Treibhausgasemissionseinsparungen von 0,22 Mt CO_2-Äq pro Jahr. Beim RMC liegen die kumulativen jährlichen Einsparungen von diesen Maßnahmen bei 0,95 Mt.

Treibhausgasemissionen

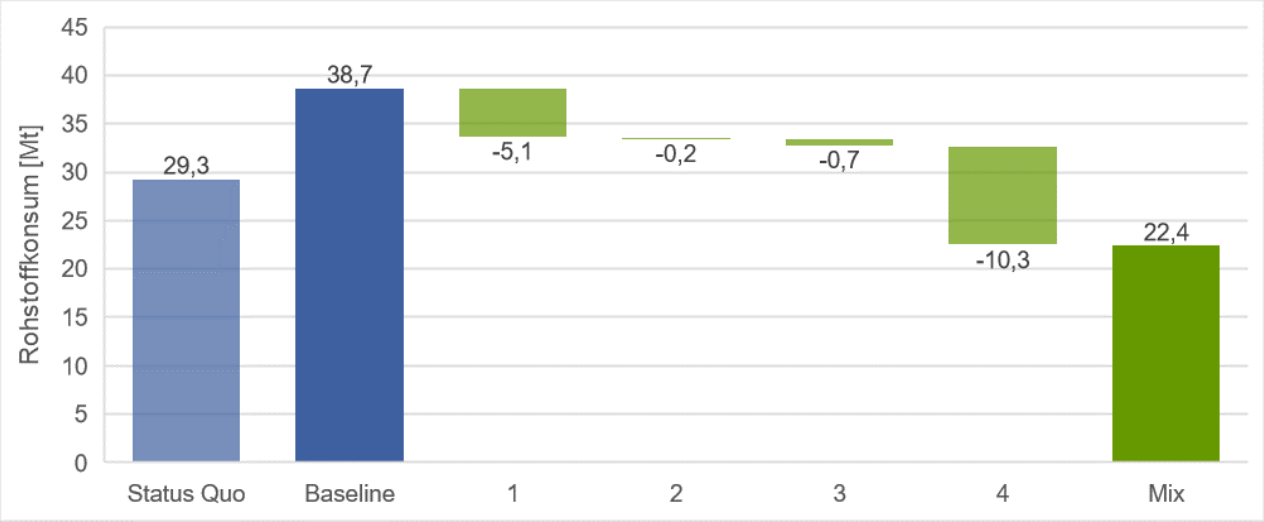
Abbildung 4-37: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte*



Quelle: Eigene Darstellung.

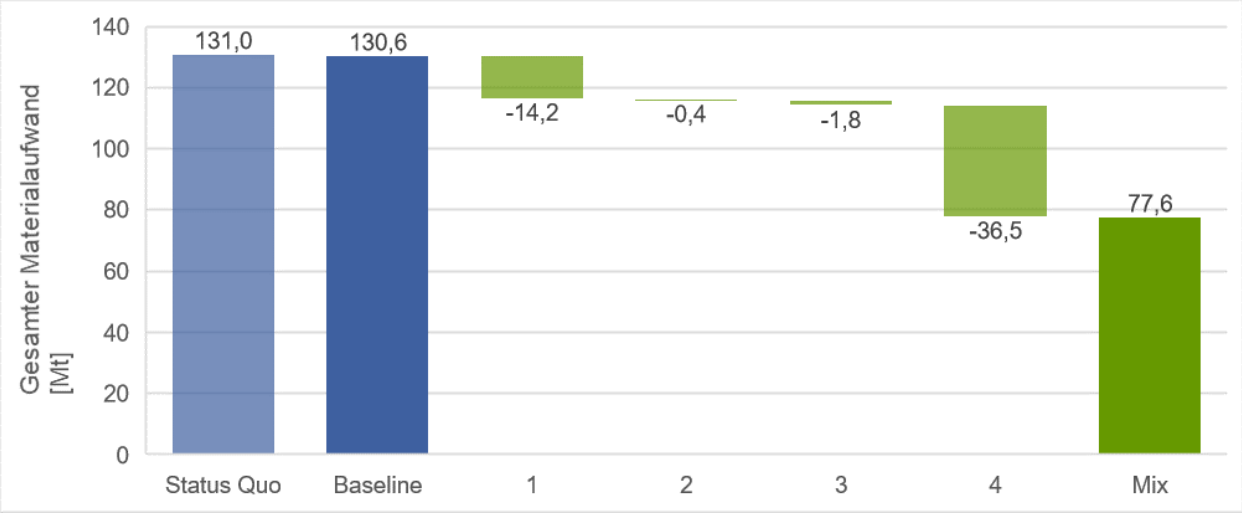
Ressourceninanspruchnahme

Abbildung 4-38: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte*



Quelle: Eigene Darstellung.

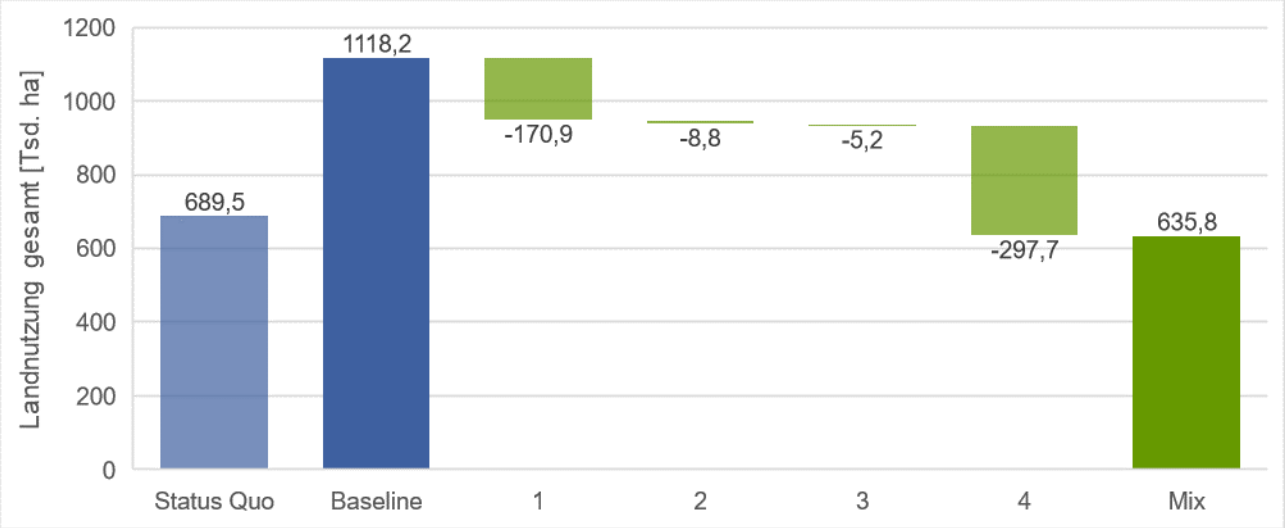
Abbildung 4-39: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte*



Quelle: Eigene Darstellung.

Landnutzung

Abbildung 4-40: Landnutzung (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte*



Quelle: Eigene Darstellung.

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Im Rahmen dieser Studie wurde zusätzlich eine LCA-basierte (bottom-up) Modellierung für die Treibhausgasemissionen durchgeführt. Auf der Ebene von Einzelgeräten zeigten sich höhere Einsparpotenziale bei denjenigen Geräten, bei denen die Steigerung der durchschnittlichen Lebens- und Nutzungsdauer im Mix-Szenario im Vergleich zum Baseline besonders stark ausgeprägt ist. Das ist bei IKT-Geräten, v.a. bei Smartphones, TV-Geräten und Notebooks, der Fall. Beispielsweise liegen die Treibhausgasemissionseinsparungen im Mix-Szenario zwischen 23 % (TV-Geräte) und 44 % (Smartphone) im Vergleich zum Baseline im Jahr 2045. Absolut gesehen liegen die höchsten Treibhausgasemissionseinsparungen bei TV-Geräten, gefolgt von Smartphones an zweiter Stelle und dann Notebooks. Bei Haushaltsgeräten liegen die durchschnittlichen Lebens- und Nutzungsdauer im Baseline im Jahr 2045 auf einem höheren Niveau, so dass die Umweltentlastungseffekte im Vergleich zu IKT-Geräten geringer sind. Die Treibhausgasemissionseinsparungen bei betrachteten Haushaltsgeräten liegen im Mix-Szenario zwischen 4 % (Geschirrspüler) und 10 % (Wäschetrockner) im Vergleich zum Baseline im Jahr 2045. Die Einsparungen beim RMC sind dementgegen beträchtlich. Sie liegen bei Haushaltsgeräten bei knapp 28 %. Absolute Einsparungen sind bei Waschmaschinen und Kühl- und Gefriergeräten am höchsten.

Die Ergebnisse der LCA-basierten Modellierung stimmen zu einem großen Teil mit der MRIO-Modellierung überein. Beispielsweise liegt das jährliche Treibhausgaseinsparpotenzial der Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung im Mix-Szenario bei ca. 5,5 Mt CO_2-Äq im Jahr 2045. Mit einer LCA-basierten Modellierung läge das Treibhausgasemissionseinsparpotenzial bei ca. 4,3 Mt CO_2-Äq. Die ermittelten Einsparungen sind vergleichbar mit anderen Ökobilanzstudien, wie z.B. von Rüdenauer und Prakash (2020), wo die jährlichen Einsparpotenziale der Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Smartphones, Notebooks, Waschmaschinen und Fernsehgeräte auf knapp 4 Mt CO_2-Äq beziffert wurden.

Bei der Modellierung von Endgeräten musste eine Reihe von Annahmen und Entscheidungen getroffen werden, die einen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Beispielsweise wurden die Trans-

portaufwendungen für die Ersatzteile und zusätzliche Infrastruktur für Reparaturen und Wiederaufbereitung nicht immer berücksichtigt. Außerdem lagen zum Anteil von Second-Hand-Geräten und deren Marktentwicklung keine gesicherten Erkenntnisse vor, so dass sie sehr konservativ abgeschätzt wurden (3 % Marktanteil im Status quo und sukzessiver 3 %iger Anstieg pro Jahr bis 2045). Ebenfalls wurde der Marktanteil von Product-as-a-service (PaaS)-Modellen aufgrund von bestehenden Unsicherheiten bezüglich deren Diffusionspotenzials mit einem jährlichen Anstieg von 0,5 % Marktanteil bis 2045 konservativ angenommen. Die Unsicherheiten bei der Marktentwicklung von Second-Hand-Geräten und PaaS-Modellen spielen aber in der Gesamtbetrachtung eine vernachlässigbare Rolle, da die Kerngröße der Modellierung eine erreichte (und verlängerte) Lebens- und Nutzungsdauer war, unabhängig davon, ob sie beim Erst-, Zweit- oder Drittnutzer, oder im Second-Hand-Segment oder in den PaaS-Modellen erreicht wird.

Bei der Maßnahme Remanufacturing wurde aufgrund von fehlenden Daten zwischen IKT und Haushaltsgeräten nicht unterschieden und die Modellierung mithilfe von EE-MRIO top-down durchgeführt. Die Kerngröße der Modellierung war die aktuellen und erwarteten Umsatzveränderungen in den Refurbishment- und Elektro- und Elektronikgerätesektoren in Deutschland. Es wird angenommen, dass die Umsatzsteigerungen im Remanufacturing-Sektor negativ auf Umsätze im Elektro- und Elektronikgerätesektor wirken. Als Vergleichsgrundlage wurden die Treibhausgasemissionen anhand von Ökobilanzdaten bottom-up hochskaliert. Dabei wurden vereinfacht die Anzahl der Refurbished-Komponente und die durchschnittlichen Treibhausgasemissionseinsparungen pro Refurbished-Komponente herangezogen. Das Umweltentlastungspotenzials des Remanufacturings (Maßnahme 2) für den Gesamtbereich der Elektro- und Elektronikgeräte ist viel höher als in der Modellierung im Rahmen der Studie ermittelt. Denn die Studie deckt nur 9 Geräte ab und nicht den gesamten Elektro- und Elektronikgerätesektor. Dementsprechend beziehen sich die Berechnungen der ökologischen Auswirkungen auf einen eingeschränkten Umsatz im Remanufacturing-Bereich, der nur die adressierten 9 Geräte betrifft (siehe Tabelle 7-16). Diese Einschränkung gilt allerdings für alle modellierten Maßnahmen im Bereich IKT und Haushaltsgeräte.

Bei der Modellierung der Maßnahme 3 bzgl. der Sekundärrohstoffe bestehen Unsicherheiten über die Entwicklung der Materialzusammensetzung in den einzelnen Geräten in der Zukunft. Außerdem waren Daten zu Edel- und Sondermetallen bei Haushaltsgeräten mangelhaft, so dass sie auf der Grundlage der vorliegenden Daten zu IKT-Geräten nur abgeschätzt werden konnten. Einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben aber solche Unsicherheiten nicht, da die Recyclingbezogenen Aspekte über den gesamten Lebenszyklus gesehen zwar einen positiven, aber kleinen Beitrag an Gesamtumweltaufwendungen und Einsparungen leisten, wie auch einige weitere Studien zeigen (Prakash et al. 2016a; Prakash et al. 2016b).

Insgesamt liegen die genannten Datenunsicherheiten und die Nichtberücksichtigung von Einzelaspekten bei der Modellierung von Endgeräten, z.B. Transportaufwendungen oder Materialzusammensetzung von Endgeräten, im vernachlässigbaren Bereich.

Durch die Umsetzung der CE-Maßnahmen zur ressourceneffizienten Nutzung von Rechenzentren lassen sich die Treibhausgasemissionen der Rechenzentren in Deutschland im Mix-Szenario im Vergleich zum Baseline im Jahr 2045 erheblich reduzieren. Hier ist anzumerken, dass der steigende Anteil der regenerativen Energiequellen bei der Stromerzeugung in Deutschland dabei einen wesentlichen Einfluss hat. Weitere Potenziale lassen sich durch die Vermeidung von Hardware, wie z.B. IT-Technik, realisieren, da diese zu einem großen Teil in anderen Ländern hergestellt wird. Das hier ermittelte Einsparpotenzial ist mit anderen Studien vergleichbar, wonach der erwartete Anstieg am Energiebedarf der Rechenzentren auch mithilfe von Energieeffizienzgewinnen erheblich gedämpft werden kann (Hintemann et al. 2022).

Zuletzt wurden die für die MRIO-Modellierung verwendeten monetären Impulse lediglich auf der Grundlage der Kosten eines typischen Servers sowie der Energiekosten in den Rechenzentren ermittelt. Dadurch werden jedoch die Kosten weiterer Rechenzentrumskomponenten wie Speicher, Kältetechnik usw. vernachlässigt und der Gesamtumweltaufwand über den Produktlebenszyklus unterschätzt.

Die Marktentwicklung von Servern und Rechenzentren ist mit großer Unsicherheit behaftet. In der Literatur sind Marktdaten und der Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland in der Regel bis 2030 abgeschätzt. Im Rahmen dieser Studie wurde die Marktentwicklung und der Energiebedarf im Baseline ab 2030 anhand der Trendlinie fortgesetzt. Möglicherweise ist der im Rahmen dieser Studie modellierte Effekt aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung in der Industrie sowie in anderen Handlungsfeldern unterschätzt.

4.1.2.4 Lebensmittel und Ernährung

CE-Maßnahmen im Sektor Lebensmittel und Ernährung

Die Betrachtung im Handlungsfeld Ernährung erfolgt im Rahmen eines sogenannten Backcasting-Ansatzes (vgl. Abschnitt 7.2.4). Als Leitbild der Circular Economy im Bereich Ernährung und Lebensmittel wird eine Ernährungsweise bzw. ein Ernährungssystem definiert, welches eine hochwertige, vielfältige und gesunde Ernährung der Bevölkerung erlaubt und gleichzeitig sicherstellt, dass die Bereitstellung der dafür nötigen Lebensmittel innerhalb der Grenzen globaler, ökosystemarer Tragfähigkeiten operiert. Für die vorliegende Studie wird davon ausgegangen, dass eine Ernährung, die diesen Anforderungen genügt, auch anschlussfähig an das Konzept einer Circular Economy für den Sektor Lebensmittel und Ernährung ist.

Im Kontext des MDCE-Vorhabens werden unter dem Sektor Lebensmittel und Ernährung zwei wesentliche Wirkbereiche adressiert: Ernährungsstile bzw. die Veränderung von Ernährungsstilen hin zu einer Ernährung, die es erlaubt, die benötigten Lebensmittel so zu produzieren, dass planetare Belastungsgrenzen nicht überschritten werden, und Vermeidung von Lebensmittelabfällen in privaten Haushalten und entlang der Wertschöpfungskette bzw. im Außer-Haus-Verzehr (AHV). Daraus leiten sich die drei folgenden Maßnahmen ab:

1. Umstellung auf stärker pflanzenbetonte Ernährungsweise (u.a. durch pflanzliche Fleischalternativen),
2. Umstellung auf stärker pflanzenbetonte Ernährungsweise, alternative Proteinquellen (Biotechnologie, synthetische Fleischalternativen)
3. Vermeidung von Lebensmittelabfällen

Wie in anderen Handlungsbereichen ist auch für den Sektor Lebensmittel und Ernährung festzuhalten, dass angesichts der verfügbaren Datengrundlage und methodischer Festlegungen bei der Modellierung ein eher statischer Fokus auf die derzeitig vorherrschende Produktionsweise gelegt wird. Im vorliegenden Fall des Sektors Lebensmittel und Ernährung betrifft dies konkret die Art und Weise, wie Lebensmittel produziert werden. Potenzielle zukünftige Änderungen der Produktionsweise bzw. eine Verschiebung des Verhältnisses verschiedener Produktionsweisen (z.B. Verhältnis konventionelle Landwirtschaft zu ökologisch produzierten Lebensmitteln) stehen demnach nicht im Fokus der Betrachtung. Entsprechende Veränderungen korrelieren aber mit dem im vorliegenden Vorhaben modellierten Maßnahmenbündel in vielfältiger und wechselseitiger Weise. So stellt eine Veränderung des Nahrungsmittelkonsums (z.B. durch *Dietary Shift* hin zu einer pflanzenbetonten Ernährungsweise) einen Impuls mit wesentlichem Einfluss auf die vorherrschenden Umfeldbedingungen der Lebensmittelproduktion dar. Dies wiederum kann sich positiv auf die sich bietenden Handlungs-

und Gestaltungspotenziale (im Sinne der Verbesserung der derzeitigen landwirtschaftlichen Produktionsweise) auswirken. Entsprechende Ansätze, wie etwa der Ausbau ökologischer Landwirtschaft, die flächendeckende Umsetzung einer flächengebundenen Tierhaltung oder aber auch die Verringerung beim Einsatz von Pflanzenschutz- und Düngemitteln und Ansätze zum Precision Farming und einer smarten Belegung landwirtschaftlicher Nutzflächen können hierdurch unterstützt werden.

Szenariovergleich

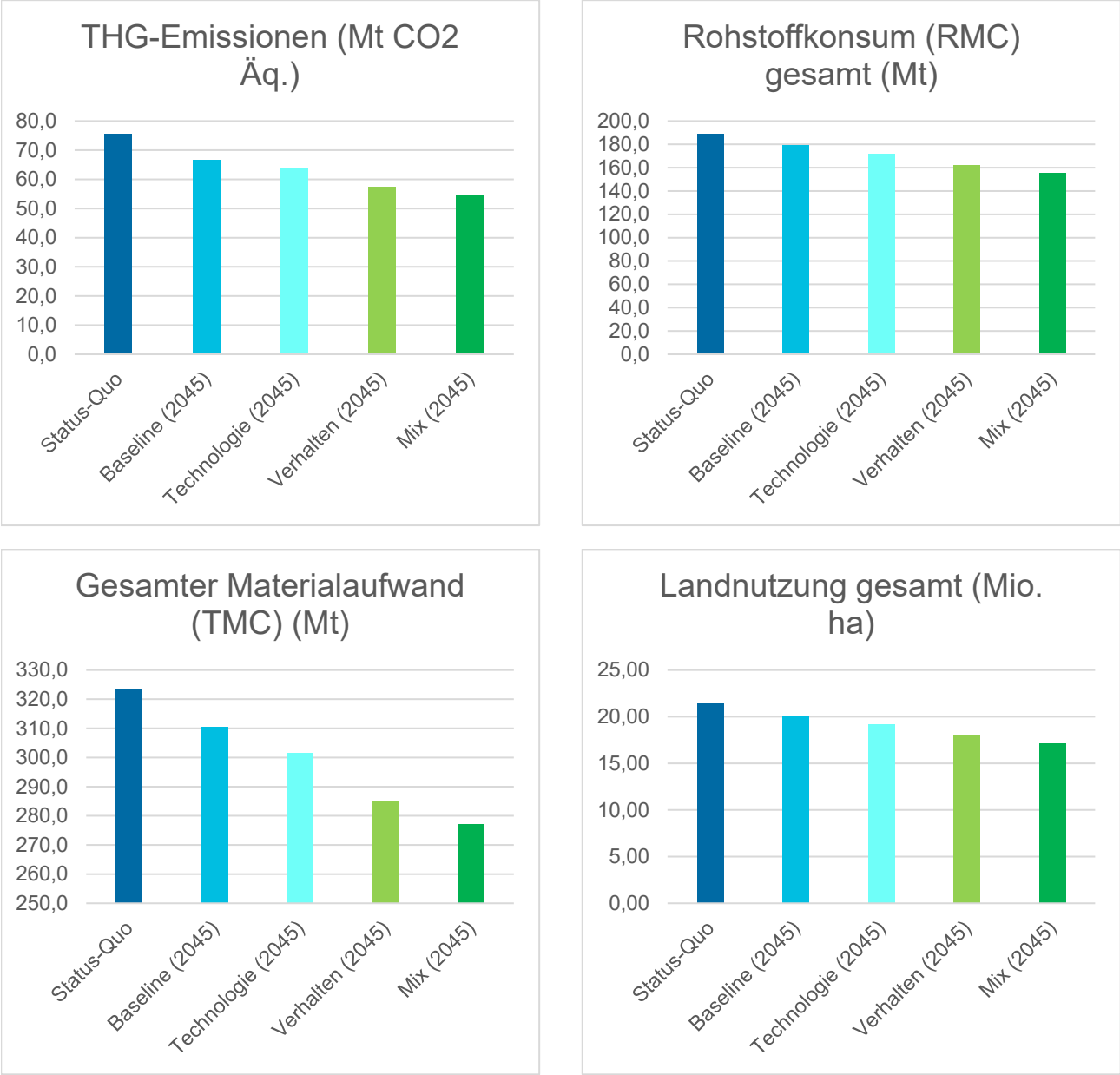
Bezogen auf das Konsumverhalten bei Lebensmitteln zeigte sich in Deutschland in den letzten Jahren ein stabiler Trend. Die Zahl der Verbraucher*innen, die die gegenwärtige, aus Umweltsicht stark durch den Konsum tierischer Produkte bestimmte Ernährungsweise kritisch betrachten, wächst. Auch der Anteil derer, die bereit sind, ihr Ernährungsverhalten entsprechend umzustellen, wächst, wenn sicherlich auch in sehr unterschiedlicher Weise und Konsequenz. In der Gesamtschau sinkt der pro Kopf Fleischkonsum in Deutschland. Verbraucher*innen entscheiden sich, aus einer Vielzahl unterschiedlicher Gründe zunehmend für eine fleischreduzierte und teilweise auch konsequent vegetarische oder vegane Ernährungsweise.

Diese Tendenz zu einem reduzierten Fleischkonsum wird in der vorliegenden Studie im **Baseline-Szenario** berücksichtigt, indem der für die Jahre 2015-2020 statistisch ermittelte Trend linear extrapoliert bzw. bis ins Jahr 2045 fortgeschrieben wird. Dies ist auch der wesentliche Grund dafür, dass im Sektor Lebensmittel und Ernährung auch im Baseline-Szenario die Umweltauswirkungen für alle betrachteten Wirkungsindikatoren sinken. So reduziert sich das Treibhauspotenzial im Baseline-Szenario um etwa 20 %, für die Ressourcennutzung jeweils um ca. 15 % und für die Landnutzung um 10-24 %[15].

Um den Fleischkonsum im Jahr 2045 auf die aus den Empfehlungen nach EAT Lancet (Willett et al. 2019) abgeleiteten Höchstmengen (1,3 Mt pro Jahr) zu reduzieren, reicht die lineare Fortschreibung des Trends der jährlichen Fleischreduktion von 1,3 % nicht aus. Im Umkehrschluss ergibt sich ein Delta von zusätzlich 3,6 %, welches durch verschiedene CE-Maßnahmen und -Instrumente geschlossen werden muss. Im Vergleich zum Baseline führen die für den Lebensmittelsektor modellierten CE-Maßnahmen im **Mix-Szenario** zu einer Reduktion des Treibhauspotenzials von 32-47 %, der Ressourcennutzung, fossil um 29-41 %, der Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle um 15-40 % und der Landnutzung um 27-55 % im Jahr 2045. Die Spannbreiten sind abhängig von der Datenbank, die für die Modellierung verwendet wurde.

[15] Die Spannbreiten sind abhängig von der für die Modellierung verwendeten Datenbank, zur Erläuterung der hier und im Folgenden angegebenen Bandbreite siehe „Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten“ am Ende dieses Kapitels.

Abbildung 4-41: Vergleich der Szenarien – *Lebensmittel und Ernährung*



Anmerkung: Für die Modellierung der Ressourcennutzung wurde für den Sektor Lebensmittel und Ernährung ein zweigleisiges Verfahren gewählt. Bei der Beschreibung der Ressourcennutzungseffekte auf Eben der Maßnahmen erfolgt die Diskussion der Ergebnisse der Bottom-Up LCA-Analyse auf Basis der Auswertung der LCA-Indikatoren Ressourcennutzung (fossil) und Ressourcennutzung (Metalle und Mineralien). Aufgrund der höheren Granularität der Auflösung des Bottom-Up-LCA Modells erscheint eine Diskussion der Maßnahmenwirkung auf Basis der genannten LCA-Indikatoren hier begründbar. Anders als z.B. im Falle der THG-Emissionen ist eine Addition zu den Ressourcennutzungsergebnissen der übrigen Sektoren aus der MRIO hier jedoch nicht möglich. Bei der Darstellung des Beitrags des Sektors zu den Gesamtergebnissen, wurden aus Kohärenzgründen die Ergebnisse der Indikatoren RMC und TMC aus der MRIO-Modellierung herangezogen;
Quelle: Eigene Darstellung

Das **Verhalten-Szenario** hat im Lebensmittelsektor nach dem Mix-Szenario den größten Effekt auf die Umweltauswirkungen. Dies liegt vor allem daran, dass dem Konsumverhalten im Lebensmittelsektor eine im Quervergleich höhere Hebelwirkung beigemessen wird als etwaigen (produktions-) technologischen Fortschritten. Klassische Circular Economy-Strategien, wie „refurb“, „repair“ oder „recycle“ stehen im Sektor Ernährung und Lebensmittel eher nicht so stark im Fokus und sind hier vor allem im Bereich der optimierten Nutzung von Koppel- und Nebenprodukten der landwirtschaft-

lichen Produktion bzw. der Verarbeitung zu diskutieren. Das Verhalten-Szenario führt für das Treibhauspotenzial zu einer Reduktion von 25-36 %, für die „Ressourcennutzung fossil“ von 23-32 %, für die „Ressourcennutzung Mineralien und Metalle“ von 13-33 % und für die Landnutzung von 20-43 %.

Im **Technologie-Szenario** werden entsprechend vergleichsweise geringere Einsparpotenziale durch die CE-Maßnahmen abgebildet als im Verhalten-Szenario. Technologische Fortschritte wie die Entwicklung von synthetischen Fleischalternativen können zukünftig gegebenenfalls zu einer Reduktion der ernährungsbedingten Umweltbelastungen beitragen. Hier muss jedoch neben notwendigen technischen Fortschritten und Weiterentwicklungen zunächst auch die Markteinführung (inkl. Marktakzeptanz bei den Konsumierenden) gelingen. Zudem ist entscheidend, dass entsprechende Alternativen unter Einsatz eines weitgehend dekarbonisierten Energiemix hergestellt werden. Das Technologie-Szenario führt zu einer Reduktion des Treibhauspotenzials von 12-18 %, der „Ressourcennutzung fossil“ von 10-15 %, der „Ressourcennutzung Mineralien und Metalle“ von 5-14 % und der Landnutzung von 10-20 %.

Maßnahmenvergleich

Auf der Ebene der CE-Maßnahmen wirkt sich eine Reduzierung des Fleischkonsums durch eine Ernährungsumstellung nach EAT-Lancet für alle betrachteten Wirkungskategorien im Mix-Szenario am deutlichsten auf das Emissionseinsparpotenzial im Vergleich zum Baseline-Szenario aus. Eine den Empfehlungen nach EAT-Lancet entsprechende Reduktion des Fleischkonsums trägt mit 76 % zum THG-Einsparpotenzial der modellierten CE-Maßnahmen bei. Der Fleischkonsum und besonders der Futtermittelanbau ist ein entscheidender Treiber der ernährungsbedingten Umweltauswirkungen. Entsprechend positiv wirkt sich eine Reduktion des Fleischanteils an der Ernährung auf das ernährungsbedingte Treibhauspotenzial und die ernährungsbedingte Inanspruchnahme von Ressourcen aus.

Die CE-Maßnahme Reduzierung von vermeidbaren Lebensmittelabfällen hat für alle betrachten Wirkungskategorien einen deutlichen Einspareffekt. Durch eine Reduzierung der vermeidbaren Lebensmittelabfälle sinkt der Bedarf an Lebensmitteln insgesamt, was sich besonders positiv auf die Wirkungsindikatoren Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle und die Landnutzung auswirkt. Den größten Effekt hat die CE-Maßnahme bei der Wirkungskategorie Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle bei der rund 50 % des gesamten Einsparpotenzials auf diese CE-Maßnahme zurückzuführen sind. Eine Reduzierung der vermeidbaren Lebensmittelabfälle um 50 % trägt demnach rund 20 % des gesamten Einsparpotenzials an Treibhausgasemissionen bei.

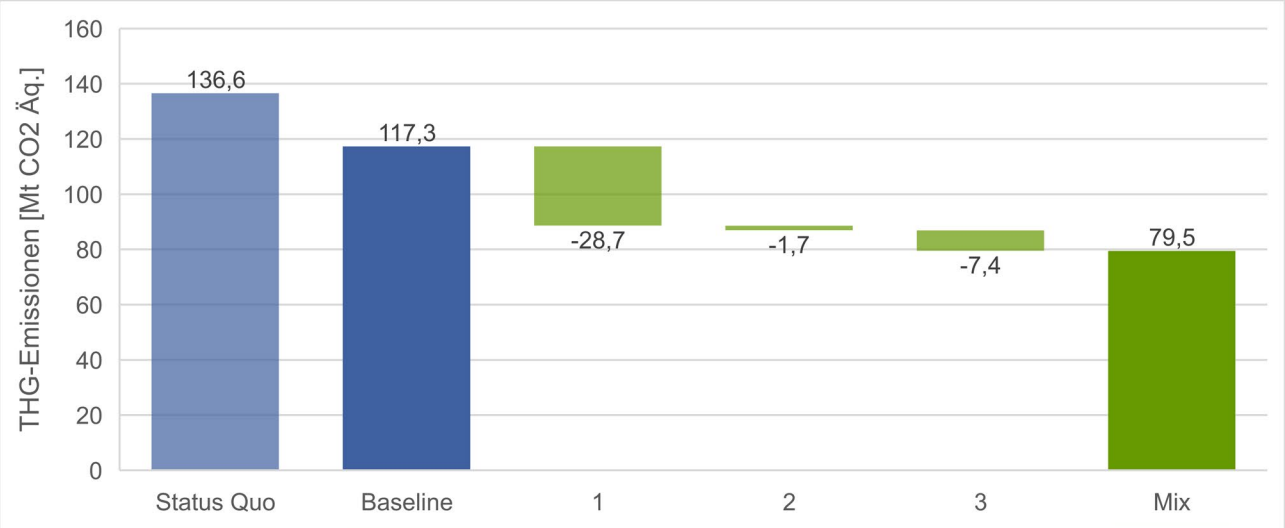
Beim Quervergleich der verschiedenen Ernährungsweisen fällt auf, dass die Status quo-Ernährung mit 1640 kg CO_2-Äq pro Person und Jahr das deutlich höchste Treibhauspotenzial aufweist. Mit ca. 23 % niedrigeren Emissionen folgt die fleischreduzierte Ernährungsweise (1260 kg CO_2-Äq pro Person und Jahr). Die vegetarische Ernährung liegt mit 910 kg CO_2-Äq pro Person und Jahr noch einmal deutlich unter dem Ergebnis des fleischreduzierten Ernährungsstils. Das geringste Treibhauspotenzial wird mit 780 kg CO_2-Äq pro Person und Jahr für die vegane Ernährungsweise berechnet. Die Umstellung von einer Status quo-Ernährungsweise auf eine vegetarische oder vegane Ernährungsweise führt im vorliegenden Fall zu einem Einsparpotenzial von 45 % beziehungsweise 53 %.

Die Substitution von Fleisch durch synthetische Fleischalternativen hat unter den für die vorliegende Studie getroffenen Annahmen (u.a. Zeitpunkt der Verfügbarkeit am Markt und Grad der zukünftigen Marktdurchdringung) einen eher geringen Einfluss auf die ernährungsbedingten Umweltauswirkungen. Je nach betrachteter Wirkungskategorie kann diese CE-Maßnahme auch zu einem geringfügigen Anstieg der Emissionen führen, was auf den zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch recht hohen Energieaufwand bei der Herstellung entsprechender Produkte zurückgeführt werden kann. Für die

vorliegende Studie wurde hierzu ein Strommix für das Jahr 2040 angenommen, welcher zwar hauptsächlich aus Strom aus Erneuerbaren Energien besteht, allerdings auch zu rund 17 % aus fossilen Energieträgern, und hier wiederum hauptsächlich Erdgas.

Treibhausgasemissionen

Abbildung 4-42: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Lebensmittel*

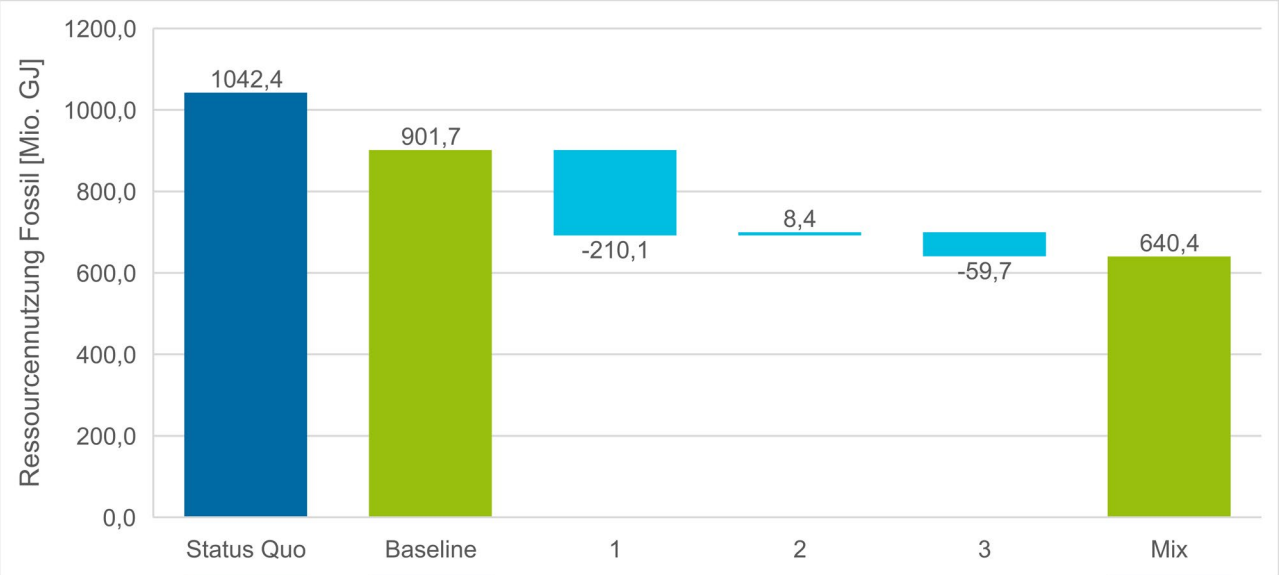


Quelle: Eigene Darstellung.

Ressourceninanspruchnahme

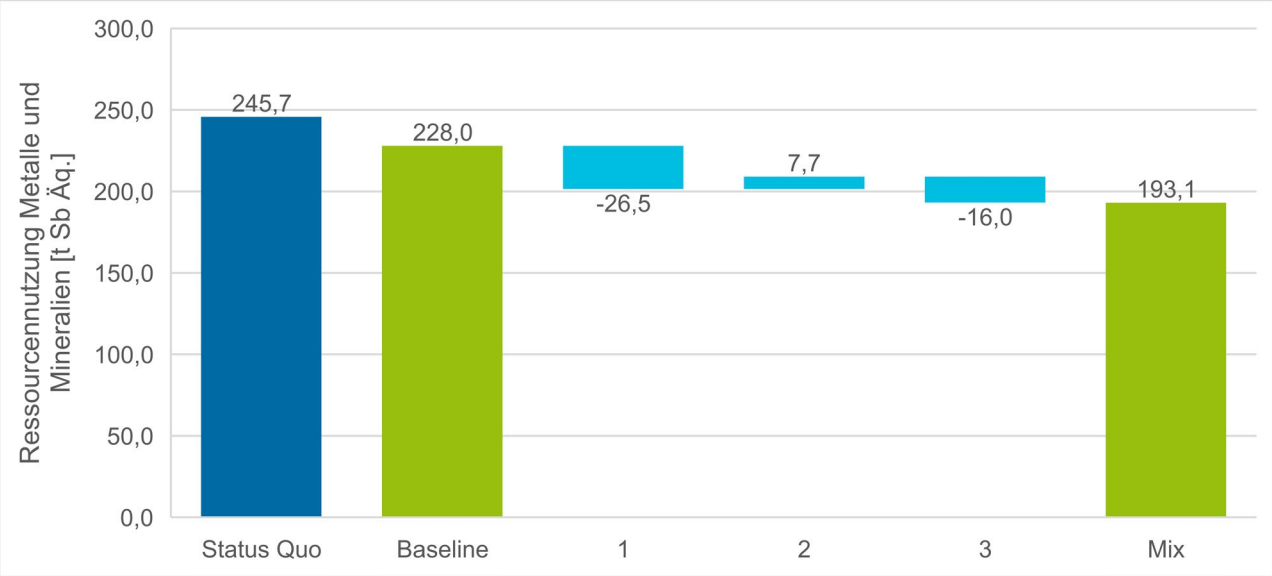
Hinweis: Für die Modellierung der Ressourcennutzung wurde für diesen Sektor ein zweigleisiges Verfahren gewählt: Bei der Beschreibung der Ressourcennutzungseffekte auf Ebene der Maßnahmen erfolgt die Diskussion der Ergebnisse der Bottom-Up LCA-Analyse auf Basis der Auswertung der LCA-Indikatoren *Ressourcennutzung (fossil)* und *Ressourcennutzung (Metalle und Mineralien)*. Aufgrund der höheren Granularität der Auflösung des Bottom-Up-LCA Modells erscheint eine Diskussion der Maßnahmenwirkung auf Basis der genannten LCA-Indikatoren hier begründbar. Anders als z.B. im Falle der THG-Emissionen ist eine Addition zu den Ressourcennutzungsergebnissen der übrigen Sektoren aus der MRIO hier jedoch nicht möglich. Bei der Darstellung des Beitrags des Sektors zu den Gesamtergebnissen, wurden aus Kohärenzgründen die Ergebnisse der Indikatoren RMC und TMC aus der MRIO-Modellierung herangezogen.

Abbildung 4-43: Ressourcennutzung, Fossil (Mix-Szenario) – *Lebensmittel*



Quelle: Eigene Darstellung.

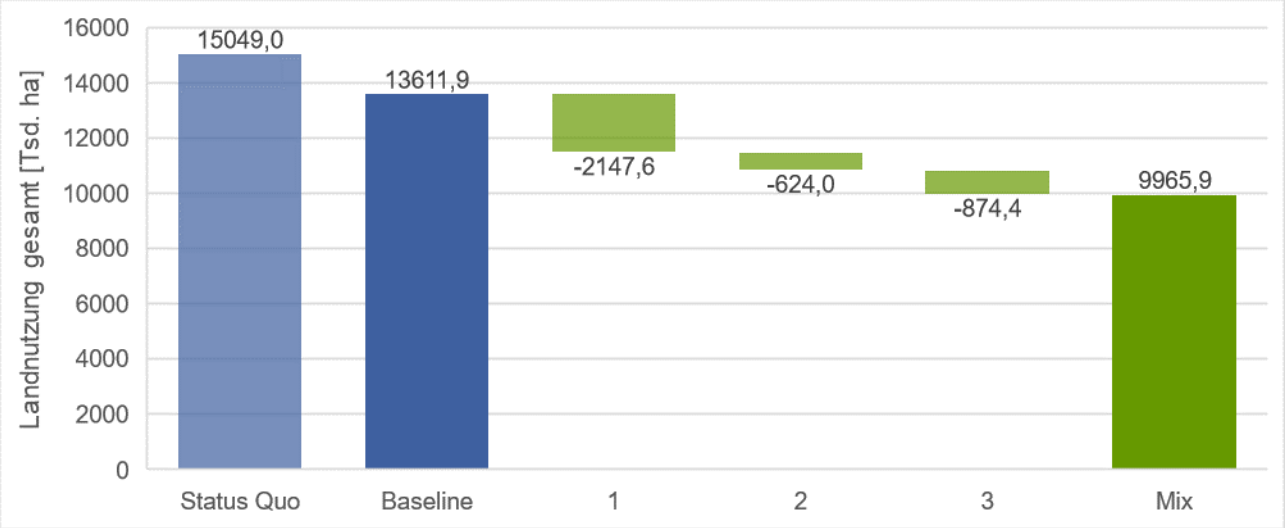
Abbildung 4-44: Ressourcennutzung, Metalle und Mineralien (Mix-Szenario) – *Lebensmittel*



Quelle: Eigene Darstellung.

Landnutzung

Abbildung 4-45: Landnutzung (Mix-Szenario) basierend auf Agribalyse – *Lebensmittel*



Quelle: Eigene Darstellung.

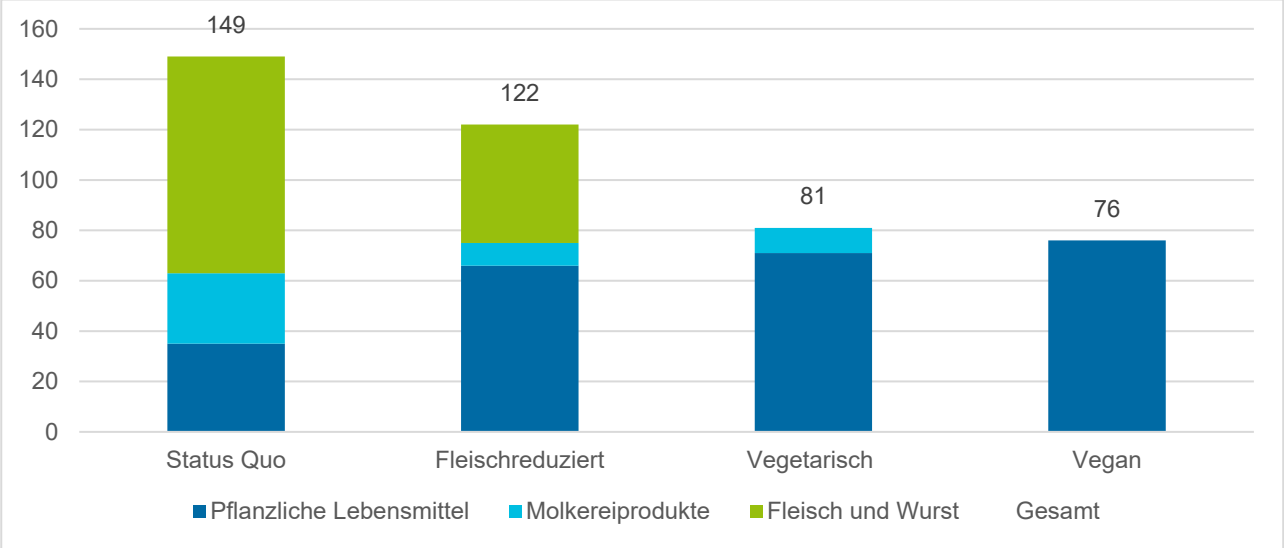
Exkurs Biodiversität

Für den Sektor Lebensmittel und Ernährung sind die mit der Bereitstellung der Lebensmittel verbundenen Biodiversitätseffekte von hoher Bedeutung. Letzteres insbesondere bedingt durch die landwirtschaftliche Agrarprimärproduktion. Vor diesem Hintergrund wurde entschieden, eine zusätzliche Betrachtung biodiversitätsrelevanter Aspekte in diesem Sektor vorzunehmen, die insbesondere auch anschlussfähig an die im vorliegenden Vorhaben erstellten Bottom-Up LCA-Ansätze ist.

Hierzu wurde, aufbauend auf die in der Studie von Dräger de Teran (2022) durchgeführte Biodiversitätsbewertung, eine Abschätzung der potenziellen Biodiversitätseffekte durch veränderte Ernährungsstile durchgeführt. In nachfolgender Abbildung 4-46 sind die als Ausgangspunkt der Betrachtung genutzten Ergebnisse der Biodiversitätsbewertung je Ernährungsweise und bezogen auf den Konsum pro Kopf und Jahr dargestellt. Bei dem der Biodiversitätsbewertung zugrundeliegenden Indikator handelt es sich um eine sogenannte Fußabdruckmethode, konkret um den Indikator der Biodiversitätsdifferenz (engl. Biodiversity Value Increment (BVI) pro Quadratmeter und Jahr. Entsprechend steht ein geringerer Biodiversitätsfußabdruck für ein geringeres Biodiversitätsverlustpotenzial.

Nach Berechnungen von Dräger de Teran (2022) werden 77 % des Biodiversitätsverlustpotenzials der Status quo-Ernährung auf Lebensmittel tierischen Ursprungs (Fleisch, Wurst, Eier und Molkereiprodukte) zurückgeführt. Bei der fleischreduzierten Ernährung sind es 23 % und bei der vegetarischen Ernährung sind es 12 %, siehe Abbildung 4-46. Die Berechnung des ernährungsstilbedingten Biodiversitätsverlustpotenzials wurde anhand der in dieser Studie modellierten Veränderung der Ernährungsweisen in Deutschland durchgeführt. Für das Jahr 2045 wird für den gesamtdeutschen Nahrungsmittelkonsum eine nach Empfehlungen der EAT Lancet Kommission PHD-konforme Ernährung angenommen. Die Einteilung der verschiedenen Szenarien erfolgt analog dem in Kapitel 7.2.4 beschrieben Verfahren.

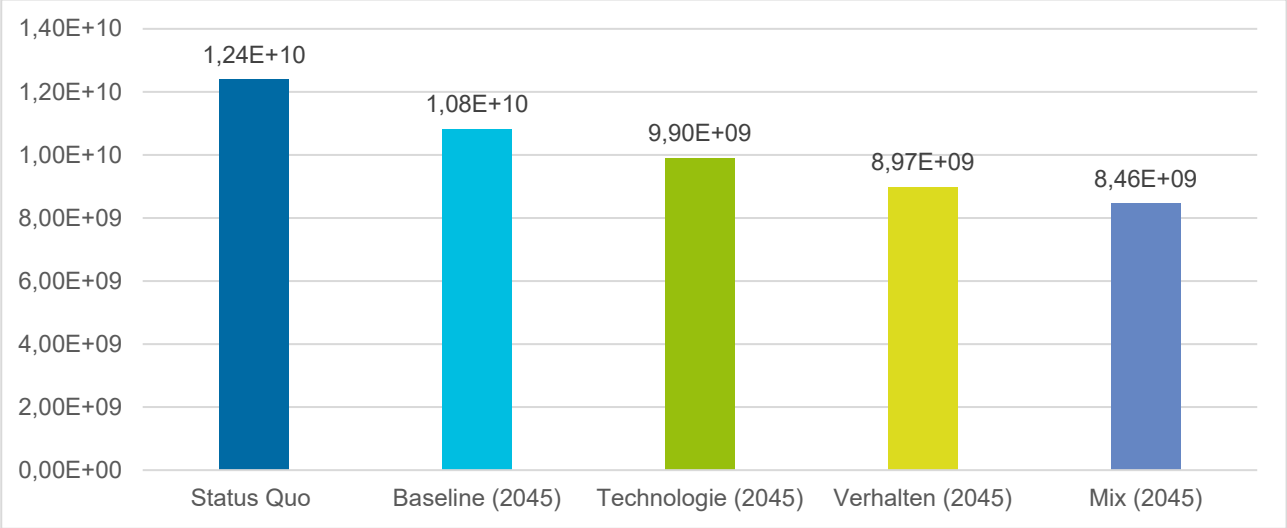
Abbildung 4-46: Fußabdruck des Biodiversitätsverlustpotenzials der verschiedenen Ernährungsweisen pro Person (BVI m²a)



Quelle: Eigene Darstellung nach Dräger de Teran (2021)

Die Status quo-Ernährung verursacht im Lebensmittelsektor eine Biodiversitätsdifferenz von 1,24 E + 10 BVI m² und Jahr (Abbildung 4-47). Würde hingegen, wie im Baseline-Szenario der momentane Trend einer jährlichen Fleischreduktion von 1,3 % bis 2045 anhalten, reduziert sich die Biodiversitätsdifferenz um 13 %. Bei einer jährlichen Reduzierung des Fleischkonsums um 2,4 %, wie sie für das Technologie-Szenario prognostiziert wird, reduziert sich die Biodiversitätsdifferenz um 20 %. Beim Verhalten-Szenario sind es 28 % und bei einer jährlichen Fleischreduktion von 4,9 % bis 2045, der notwendigen Reduktion in Hinblick auf eine PHD-konforme Ernährungsweise in Deutschland wird eine Reduzierung der Biodiversitätsdifferenz von ca. 32 % im Mix-Szenario erreicht. Hauptsächlich für diese Effekte ist, wie schon beschrieben, die absolute Reduktion des Fleischkonsums in Deutschland.

Abbildung 4-47: Vergleich der Szenarien nach Biodiversität in Biodiversitätsdifferenz (BVI m²a)



Quelle: Eigene Darstellung.

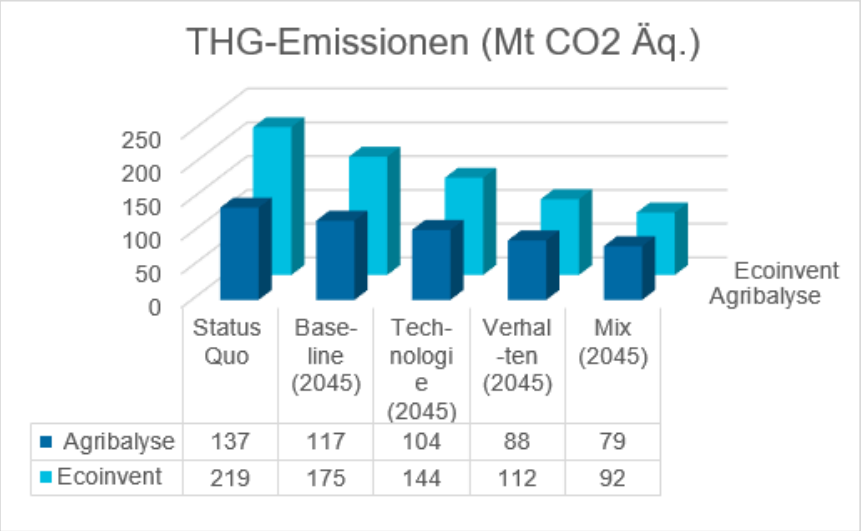
Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Bei der Abschätzung potenzieller Umweltbelastungen der Nahrungsmittelproduktion ergeben sich deutliche größere und im Vergleich zu anderen Sektoren mitunter erhebliche Schwankungsbreiten. Entsprechend hat bereits die Festlegung auf die zugrunde gelegte Datenbasis einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse (vgl. Abbildung 4-48).

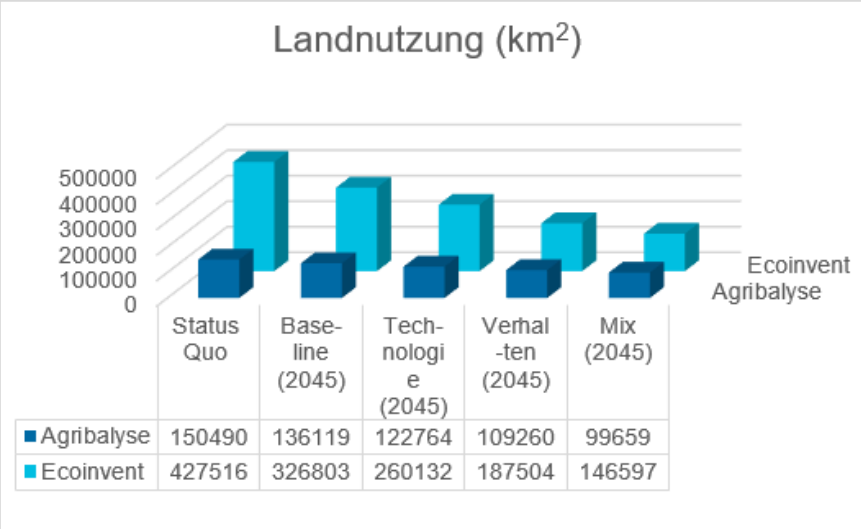
Dies gibt einen Eindruck von den Unterschieden, die sich durch die Wahl einer unterschiedlichen Datenbasis in den verschiedenen Szenarien ergeben. In dunkelblau dargestellt sind die Gesamtergebnisse, wenn die Bereitstellung der konsumierten Lebensmittel auf Basis der Datenbank *Agribalyse* modelliert wird. Hellblau dargestellt sind die insgesamt höheren potenziellen Umweltbelastungen des Sektors Lebensmittel, wenn dasselbe Modell auf Basis von Datensätzen aus der Datenbank *ecoinvent V3.9* modelliert wird. Wichtig ist festzuhalten, dass sich die Ergebnisse vor allem in Bezug auf die Abschätzung der absoluten Umweltbelastungen unterscheiden. Unabhängig davon zeigt sich aber in beiden Fällen ein gleichlaufender und deutlicher Umweltentlastungseffekt der verschiedenen CE-Szenarien gegenüber dem Status quo.

Bezogen auf die THG-Emissionen im Sektor Lebensmittel unterscheiden sich die Treibhauspotenziale im Status quo um mehr als 80 Mt CO_2-Äq. Bezogen auf den Pro-Kopf-Konsum im Status quo errechnet sich für eine auf *Agribalyse*-Datensätzen basierende Modellierung ernährungsbedingte THG-Emissionen von 1,6 t CO_2-Äq pro Person und Jahr. Demgegenüber weist eine auf *ecoinvent*-Datensätzen basierende Modellierung THG-Emissionen in Höhe von etwa 2,6 t CO_2-Äq pro Person und Jahr auf. Für diesen nicht unerheblichen Unterschied sind vor allem unterschiedliche Modellierungsansätze bei den tierischen Lebensmitteln verantwortlich. So weisen tierische Lebensmittel (v.a. Schweinfleisch, Wurst, Käse) bezogen auf je 1 kg Produkt in *ecoinvent* teilweise deutlich höhere potenzielle Umweltauswirkungen auf. Der allein auf die gewählte Datenbasis zurückzuführende Unterschied bei den Ergebnissen wird in den Abschätzungen für die Situation im Jahr 2045 geringer. Hier wirkt sich aus, dass mit dem Rückgang beim Fleischkonsum auch der beschriebene Effekt unterschiedlicher Modellierungsansätze für tierische Produkte geringer wird.

Abbildung 4-48: Vergleich der Szenarien für die Indikatoren *THG* und *Landnutzung* mit zwei verschiedenen Datenbasis (Agribalyse & ecoinvent)



	Status Quo	Base-line (2045)	Tech-nologie (2045)	Verhal-ten (2045)	Mix (2045)
Agribalyse	137	117	104	88	79
Ecoinvent	219	175	144	112	92



	Status Quo	Base-line (2045)	Tech-nologie (2045)	Verhal-ten (2045)	Mix (2045)
Agribalyse	150490	136119	122764	109260	99659
Ecoinvent	427516	326803	260132	187504	146597

Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Darstellung der übergeordneten Ergebnisse bzw. beim Vergleich der Ergebnisse verschiedener Sektoren wird jeweils der Ergebniswert aus der Modellierung auf Basis von *Agribalyse* dargestellt.

Weitere Festlegungen und Annahmen, die der Modellierung im Sektor Lebensmittel zu Grunde liegen und die bei der Interpretation der Ergebnisse mitbetrachtet werden müssen, betreffen u.a. die die Festlegung der Fleischreduktionspfade in den verschiedenen Szenarien, die Festlegung auf vollwertige und ernährungsphysiologisch sinnvolle Ernährungsstile, bei denen jedoch keine im Sinne ungesunder Ernährung (z.B. Unter- oder Überversorgung mit Nährstoffen) berücksichtigt werden. Ebenso haben die Festlegungen zur Umstellung des Ernährungsverhaltens einen Einfluss auf das Ergebnis. Eine detailliertere Darstellung der getroffenen Annahmen ist im Anhang dokumentiert (vgl. Abschnitt 7.2.4).

4.1.2.5 Textilien

CE-Maßnahmen im Textilsektor

In dem Textilsektor wurden folgende CE-Maßnahmen im Hinblick auf deren ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzungen modelliert:

1. Förderung einer längeren Nutzungsdauer bereits vorhandener Textilien, z.B. Reduktion der Kleidungsstücke pro Schrank
2. Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen z.B. Sharing Economy bzw. product-as-a-service
3. Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung (Incl. Reparatur)
4. Förderung des Faser-zu-Faser (F2F) Textilrecyclings für Baumwolltextilien

Die Maßnahmen wurden für Bekleidung modelliert, unter der Annahme, dass der Faseranteil wie folgt ist: 65 % Chemiefasern, 28 % Naturfasern aus Agrarproduktion und 8 % andere Textilmaterialien. Eine Beschreibung der Maßnahmen und deren Modellierung sowie Ausprägung in den Szenarien befinden sich im Anhang (7.2.5). Zentrale Daten und Annahmen für die Modellierung sind ebenfalls im Anhang zusammenfassend dargestellt.

Szenarienvergleich

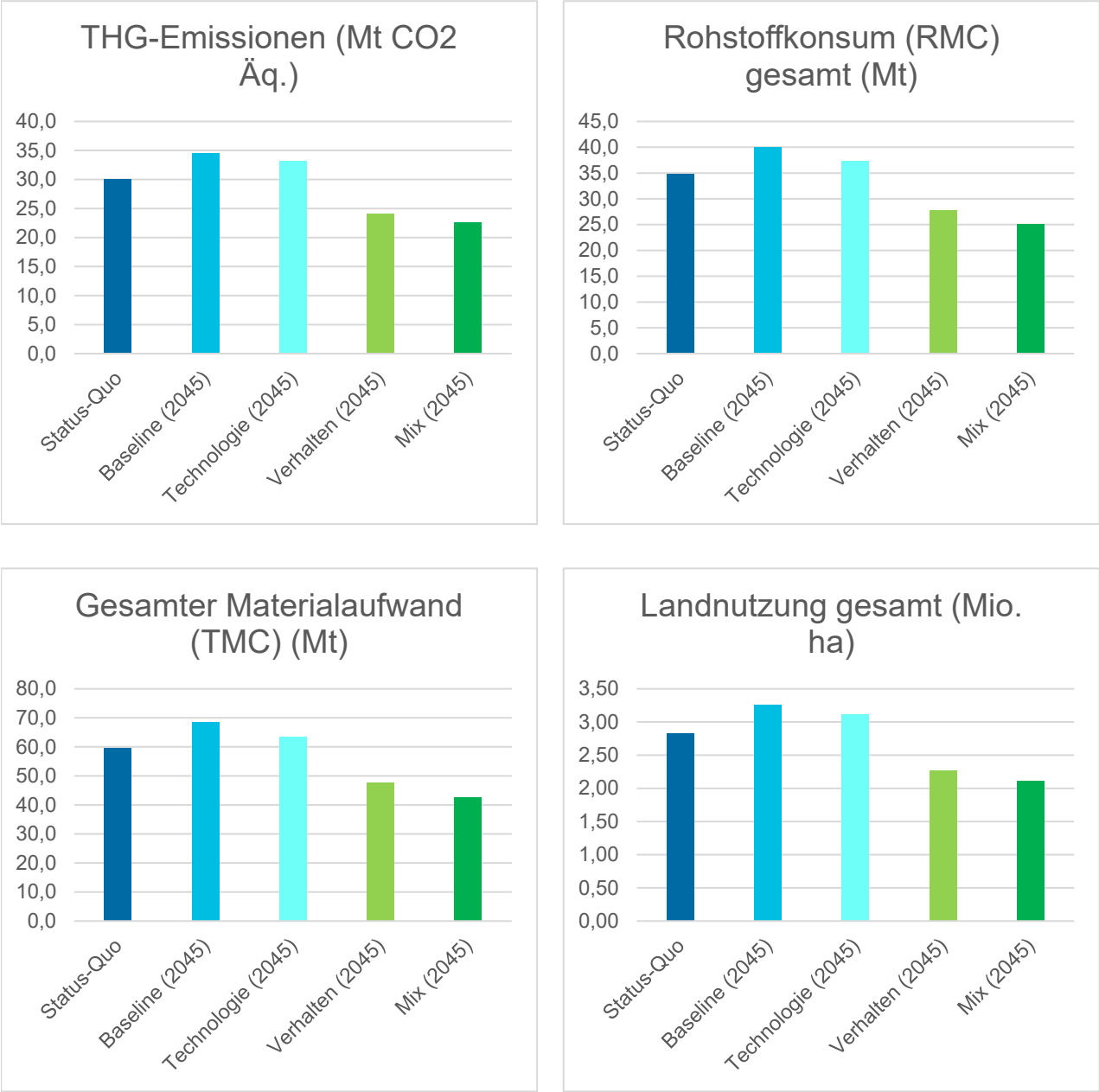
Ohne CE-Maßnahmen würden die Umweltauswirkungen im Vergleich zwischen Status quo und **Baseline** im Jahr 2045 bei allen Wirkungskategorien um 15 % zunehmen, weil man zunächst einen zukünftigen Anstieg der verkauften Warenmenge erwartet und berücksichtigt (siehe *Einordnung der Ergebnisse*). Das entspricht THG-Emissionen von 4,5 Mt CO_2-Äq, einer Erhöhung des RMC um 5,3 Mt und einer Zunahme der Landnutzung um 0,4 Mha.

Im Vergleich zum Baseline führen die im Rahmen dieser Studie modellierten CE-Maßnahmen zu einer Reduktion der THG-Emissionen und der Landnutzung um 35 %, und des Rohstoffkonsums (RMC) um 37 % im **Mix-Szenario** im Jahr 2045. Die Reduktionen entsprechen Einsparungen von 12 Mt CO_2-Äq, 14,9 Mt RMC und 1,1 Mha Land im Jahr 2045.

Nach dem Mix-Szenario hat das **Verhalten-Szenario** das zweithöchste Einsparpotenzial. Das Verhalten-Szenario hat ein höheres Entlastungspotenzial als das Technologie-Szenario, da hier der Verbrauch neuer Kleidung und damit der Ressourcenverbrauch, den die Produktion neuer Textilien mit sich bringt, erheblich reduziert wird. Das Umweltentlastungspotenzial im Verhalten-Szenario ergibt Reduktionen der THG-Emissionen, des RMC und der Landnutzung liegt etwas unter den Entlastungspotenzialen im Mix-Szenario, d.h. für alle drei Wirkungskategorien um 30 % im Jahr 2045. Im Verhalten-Szenario spielen die Maßnahmen 3 und 4 keine Rolle.

Das **Technologie-Szenario** bietet in allen Umweltkategorien das geringste Reduktionspotenzial im Vergleich zwischen Verhalten-, Technologie- und Mix-Szenario mit einer Verringerung der Umweltauswirkungen von 4 % bei den THG-Emissionen, 7 % beim RMC und 5 % bei der Landnutzung gegenüber der Baseline. Im Gegensatz zum Verhalten-Szenario spielen im Technologie-Szenario die Maßnahmen 1 und 2 keine Rolle.

Abbildung 4-49: Vergleich der Szenarien – *Textilien*



Quelle: Eigene Darstellung.

Maßnahmenvergleich

Die höchsten Umweltentlastungspotenziale ergeben sich durch die verhaltensorientierten Maßnahmen 1 und 2 (Förderung einer längeren Nutzungsdauer bereits vorhandener Textilien und Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen). Jede dieser Maßnahmen ermöglicht ein Einsparungspotenzial von jeweils etwa 22 % bei THG-Emissionen (5,3 Mt CO_2-Äq), RMC (6,1 Mt), TMC (10,4 Mt) und Landnutzung (497,8 Tsd. ha).

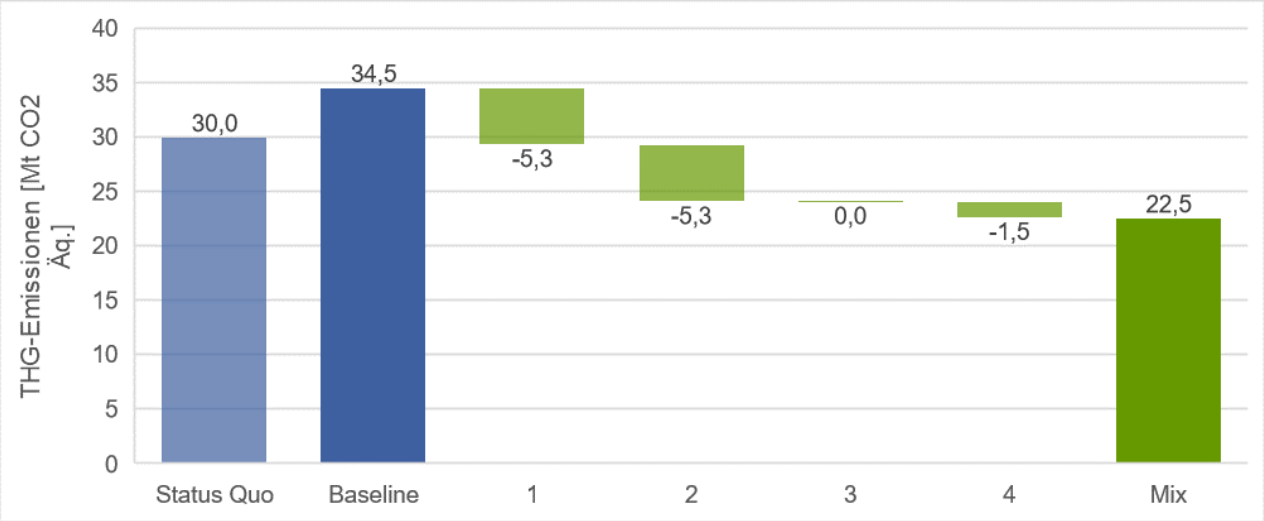
Die Umweltentlastungspotenziale bei Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung (Maßnahme 3) sind innerhalb der betrachteten Systemgrenze (Deutschland) relativ gering, da die aus

Altkleidern gewonnene Second-Hand Bekleidung größtenteils ins Ausland exportiert wird. Daher findet auch die Umweltentlastung durch Substitution neuer Bekleidung im Ausland statt.

Die Förderung des Faser-zu-Faser-Recyclings (Maßnahme 4) hat ebenfalls vergleichsweise geringe Umweltentlastungseffekte. Es handelt sich um das Potenzial, das sich mit den im Status quo verfügbaren Technologien erreichen lässt.[16] Diese Technologie eignet sich nur für bestimmte Fasern ab einer bestimmten Länge und, wenn es sich nicht um Mischgewebe, z.B. ab 10 % Elastan, oder beschichtete Textilien handelt (Duhoux et al. 2021).

Treibhausgasemissionen

Abbildung 4-50: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Textilien*

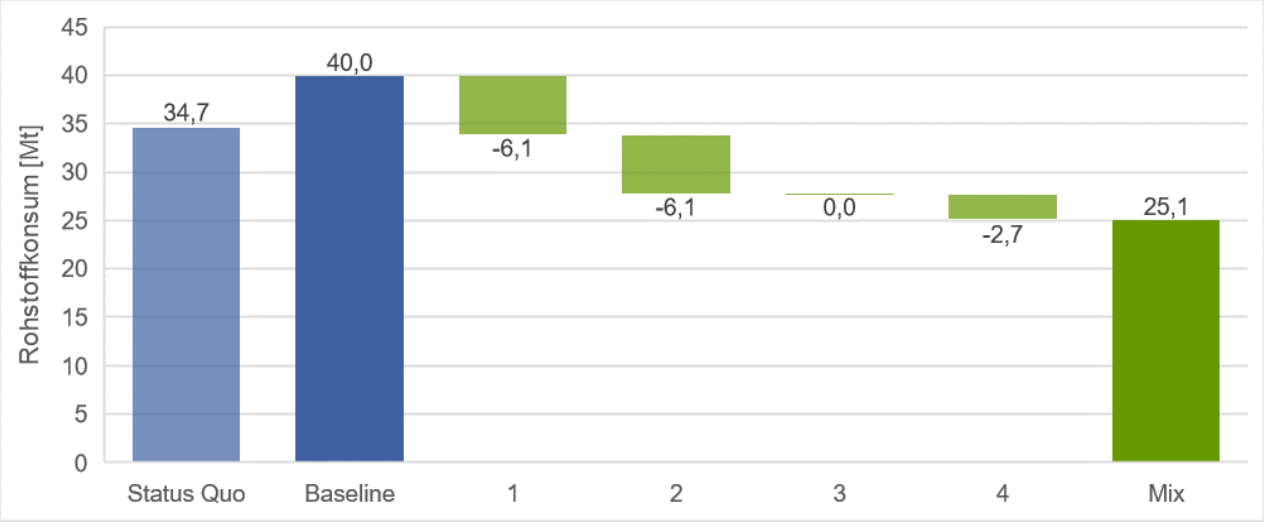


Quelle: Eigene Darstellung.

[16] Technologische Weiterentwicklungen und die zukünftigen Marktanteile sowie Massendurchsätze des Faser-zu-Faser oder des chemischen Recyclings sind derzeit schwer vorherzusehen und deshalb kaum in den Modellierungen zu berücksichtigen (siehe auch „Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten“).

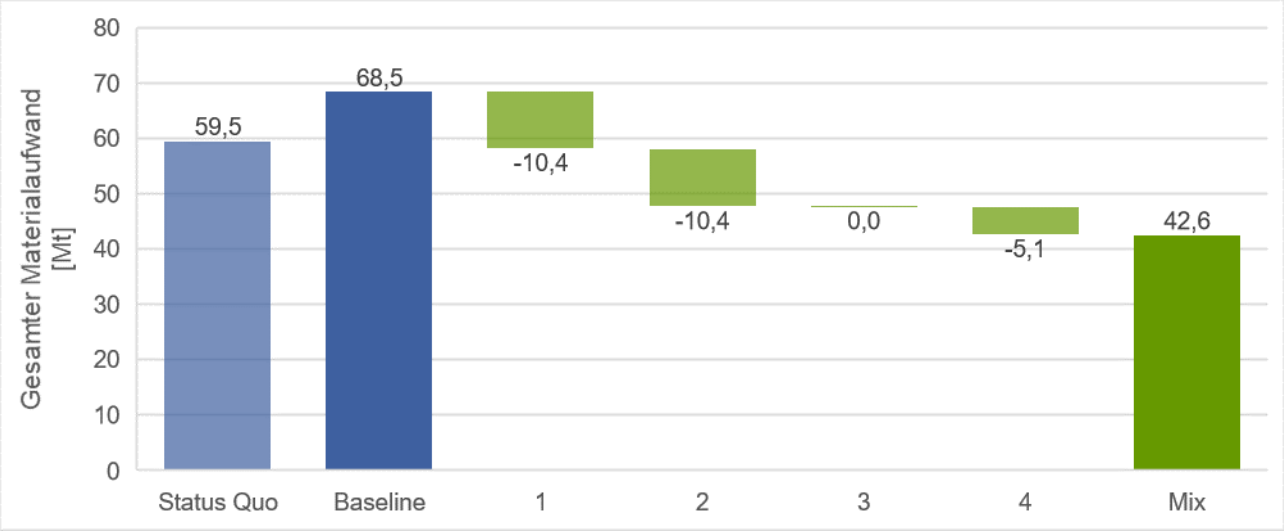
Ressourceninanspruchnahme

Abbildung 4-51: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Textilien*



Quelle: Eigene Darstellung.

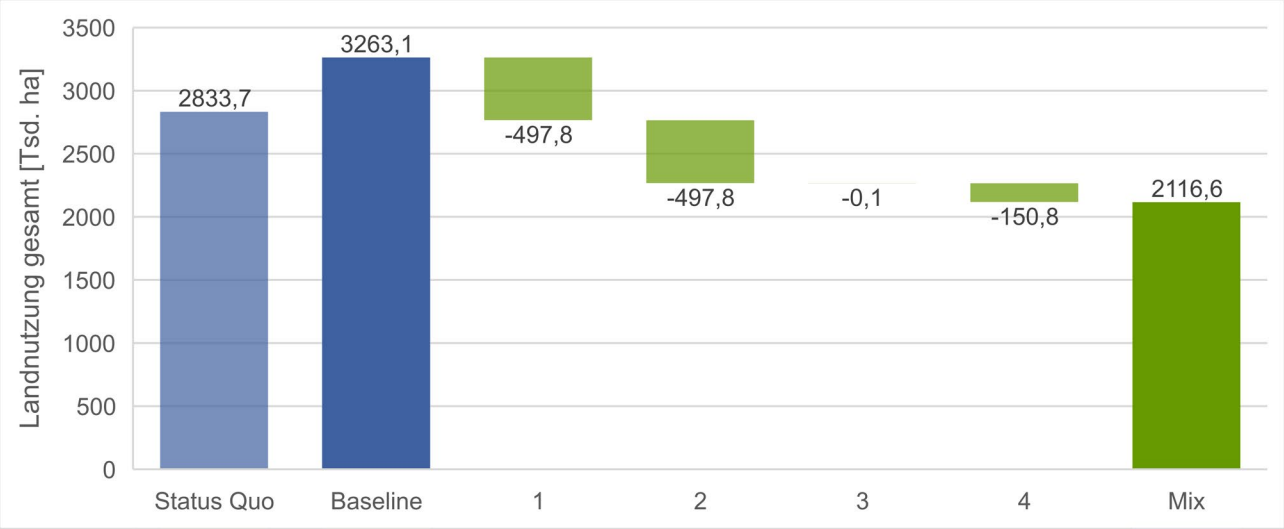
Abbildung 4-52: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Textilien*



Quelle: Eigene Darstellung.

Landnutzung

Abbildung 4-53: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Textilien*



Quelle: Eigene Darstellung.

Exkurs Biodiversität

Für den Sektor Textilien sind die mit dem Baumwollanbau und Produktionsprozess verbundenen Biodiversitätseffekte von hoher Bedeutung. Wie oben (Kapitel 3.5.4) erläutert, wird dies hier qualitativ betrachtet:

Die Ellen MacArthur Foundation (2021) fasst die Auswirkungen, wie die Bekleidungsbranche zum Biodiversitätsverlust beiträgt, in fünf Faktoren zusammen: Landnutzungsänderungen, z.B. durch Baumwollanbau als Monokultur, Überbeanspruchung von Wasserressourcen, Schadstoffemissionen, z.B. durch Pestizide, bei Färbung und Mikroplastik, Klimawandel unter anderem CO_2-Emissionen im Transport und invasive Arten durch lange Transportdistanzen in den globalen Marktverflechtungen.

Laut einer Studie von SITRA (2022) ist der Faser- und Textilsektor einer der Sektoren mit dem großem Potenzial, durch Maßnahmen der Circular Economy den Verlust der biologischen Vielfalt aufzuhalten. Durch die Wiederverwendung von Kleidung (Annahme einer 50 %igen Lebensdauerverlängerung) und das Recyceln von Fasern (Annahme: 75 % Recycling) werden Flächen frei, die Nutzung von Chemikalien und der Mikroplastikabrieb kann verringert werden und regenerative Anbaumethoden (Annahme: 60 %) kann die Transformation des Textilsektors den Druck auf die Biodiversität reduzieren. Die Umstellung auf einen kreislauforientierten Textilsektor trägt in dem von SITRA modellierten[17] Szenario zu einer 9 %igen Erholung der Biodiversität im Vergleich mit einem Business-as-Usual-Szenario bis 2050 bei. Im Vergleich der drei zugrundeliegenden CE-Strategien (Wiederverwendung, Recycling und regenerativer Anbau) gehen fast 100 % des Effekts auf die Reduzierung des Konsums zurück. In diesem Szenario sinkt die für den Baumwollanbau genutzte Fläche um 75 % bzw. 24 Mio. Hektar als Folge der zunehmenden Kreislaufwirtschaft im Textilsektor. In der Sitra-Studie wird angenommen, dass für den Bedarf an Bekleidung, der durch die Verwendung

[17] Modell: *Model of Agricultural Production and the Impact on the Environment (MAgPIE) + Biodiversity Intactness Index (BII).* Der BII entspricht dem durchschnittlicher Bestand an Wildtieren in einem geografischen Gebiet im Vergleich zu vormodernen Zeiten, SITRA (2022).

neuer Naturfasern gedeckt wird, regenerative Anbaumethoden eingesetzt werden, die aktiv zur Erhöhung der biologischen Vielfalt in den Anbauflächen beitragen. Im Vergleich dazu reduzieren die CE-Maßnahmen des Textilsektors die Flächennutzung um 35 %. Ein direkter Vergleich der Studien ist nicht möglich, da in beiden Fällen weder die Regionen, in denen Fläche frei wird, noch die Art der vermiedenen Fläche (Acker, Weide, Wald…) bekannt ist.

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Die den betrachteten CE-Maßnahmen zugrunde liegenden Annahmen sind in Anhang (7.2.50) erläutert. Für die beiden verhaltensorientierten CE-Maßnahmen 1 und 2 wurde ein Zusammenwirken einer Reihe von spezifischen Wirkungsmechanismen zur Reduktion des Verbrauchs (Suffizienz) von neuen Textilien angenommen. Diese laufen bei beiden Maßnahmen auf eine Verlängerung der Lebensdauer von Textilien hinaus. Der kausale Zusammenhang zwischen den Maßnahmen und der Verbrauchsreduktion lässt sich jedoch in der Regel nicht so einfach empirisch nachweisen und quantifizieren. Dies liegt daran, dass es noch zu wenige gut untersuchte Fallstudien zur Wirkung solcher Maßnahmen gibt. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Fallstudien zum Thema eher anekdotisch sind oder sich auf schwer zu verallgemeinernde Fallbeispiele konzentrieren. Folglich ist die Extrapolation der Auswirkungen der Maßnahmen 1 und 2 auf den gesamten Textilmarkt in Deutschland sehr unsicher. Die Annahme eines Reduktionspotenzials von 10 % des gesamten Textilverbrauchs erscheint den Autor*innen recht ambitioniert, zumal zunächst eine Abschwächung der seit Jahrzehnten anhaltenden Wachstumstrends auf dem Bekleidungsmarkt notwendig ist, bevor eine Reduktion des Textilverbrauchs erfolgen kann.

Die Auswirkungen der vier betrachteten CE-Maßnahmen lassen sich im Rahmen dieser top-down basierten Analyse jeweils nur kumulativ abschätzen, d.h. die Beiträge der unter den jeweiligen Maßnahmen zusammengefassten Handlungsoptionen (siehe „Definition der Maßnahmen“, Anhang Kapitel 7.2.5) sind nicht aufzuschlüsseln. Die Gründe dafür sind:

- Erkennbare und vermutete Datenlücken in der verwendeten Datengrundlage (EXIOBASE, siehe Kapitel 3.5)
- Kausale Zusammenhänge sowie synergistische / antagonistische Effekte einzelner Maßnahmen lassen sich mit der hier verwendeten MRIO-Methode nicht analytisch aufschlüsseln (siehe Kapitel 3.5).
- Ungewissheiten hinsichtlich der Trendextrapolation des Status quo zum Baseline-Szenario 2045: Die Summe der zukünftigen sozioökonomischen, demographischen, technologischen und regulatorischen Einflüsse lassen sich nicht detailliert antizipieren.

Auswirkungen technologischer Innovationen spielen in den verhaltensorientierten CE-Maßnahmen 1 &2 keine Rolle. Die technologieorientierten CE-Maßnahmen 3 & 4 berücksichtigen solche Effekte, die sich bereits mit den im Status quo verfügbaren Technologien erreichen lassen, sowie weitere technologische und logistische Innovationen, die dabei helfen, die Effektivität und Effizienz der Altkleidersammlung und des Textilrecyclings zu verbessern (siehe Anhang, Kapitel 7.2.5). Nicht betrachtet wurde die Option eines chemischen Recyclings, welches zukünftig v.a. für Alttextilien aus Polyester bzw. Mischgewebe eine Rolle spielen könnte. Dies hängt jedoch von Faktoren (v.a. der Wirtschaftlichkeit) ab, die außerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Studie liegen. Die Rolle sowie der Marktanteil des thermisch-chemischen Recyclings in den nächsten Jahrzehnten ist derzeit schwer vorherzusehen und deshalb kaum in den Modellierungen zu berücksichtigen.

Im Vergleich mit anderen Sektoren dieser Modellierung rangieren die Summen der Effekte der im Textil-Sektor modellierten CE-Maßnahmen in den TOP 5. Der Sektor steht an dritter Stelle der Einsparungspotenziale in der Wirkungskategorie Landnutzung, ca. 13 % des Gesamtpotenzials entfallen auf den Textilsektor (Mix-Szenario im Vergleich mit Baseline). Die Position / Relevanz gilt für Wald, Acker- und Weideland (mit nur leicht variierenden Anteilen von 14 %, 17 % und 12 % in der entsprechenden Reihenfolge). Wie im Kapitel 4.1.1 zu sehen ist, ähneln sich die Sektoren IKT, Möbel und Textilien, da die Effekte jeweils vom Status quo bis zur Baseline zunehmen, weil man zunächst einen zukünftigen Anstieg der verkauften Warenmenge erwartet und berücksichtigt. Es handelt sich, wie bei Verpackungen, Fahrzeugen oder Möbeln um einen Sektor, in dem hohe konsumseitige Veränderungen angenommen wurden.

Zum Vergleich eignet sich WRAP (2021). Dort wurde berechnet, dass bis 2030 mit drei Maßnahmen (recycelte Fasern, verstärkte Wiederverwendung und Ökodesign von Textilien) 26 % des CO_2-Fußabdrucks von Textilien reduziert werden könnte[18]. Das Reduktionspotenzial der CE-Maßnahmen bis 2045 für CO_2-Emissionen beträgt 35 %.

4.1.2.6 Möbel

CE-Maßnahmen im Möbelsektor

In dem Möbelsektor wurden folgende CE-Maßnahmen im Hinblick auf deren ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzungen modelliert:

1. Eine höhere Wiederverwendung und mehr Wiederaufbereitung von Möbeln
2. Ökodesign für langlebige Möbel
3. Mehr Verwendung von recyceltem Material

Eine Beschreibung der Maßnahmen und deren Modellierung sowie Ausprägung in den Szenarien befinden sich im Anhang (siehe 7.2.6). Zentrale Daten und Annahmen für die Modellierung sind ebenfalls im Anhang (siehe 7.2.6) zusammenfassend dargestellt.

Szenarienvergleich

Ähnlich wie IKT-/HH-Geräte und Textil ist der Möbelsektor einer, in dem zunächst vom Status quo zur **Baseline** die Umweltauswirkungen ansteigen: Ohne CE-Maßnahmen würden die Umweltauswirkungen zwischen Status quo und Baseline im Jahr 2045 bei allen Wirkungskategorien um 36 bis 45 % zunehmen. Das entspricht THG-Emissionen von 1,7 Mt CO_2-Äq, einer Erhöhung des RMC um 2,7 Mt und einer Zunahme der Landnutzung um 0,2 Mha. Es handelt sich um Sektoren, bei denen in der Baseline ein weiteres Wachstum der Märkte zugrunde gelegt wurde. Während die THG-Emissionen, der Rohstoffkonsum und der Materialaufwand im Mix-Szenario ca. denselben Wert erreichen wie im Status quo, können die CE-Maßnahmen die Landnutzung im Mix-Szenario gegenüber dem Status quo vermindern.

Im Vergleich zum Baseline führen die im Rahmen dieser Studie modellierten CE-Maßnahmen zu einer Reduktion der THG-Emissionen um 30 %, des Rohstoffkonsums (RMC) um 33 % und der Landnutzung um 44 % im **Mix-Szenario** im Jahr 2045. Die Reduktionen entsprechen Einsparungen von 1,6 Mt CO_2-Äq, 2,9 Mt Ressourcen und 0,4 Mha Land im Jahr 2045.

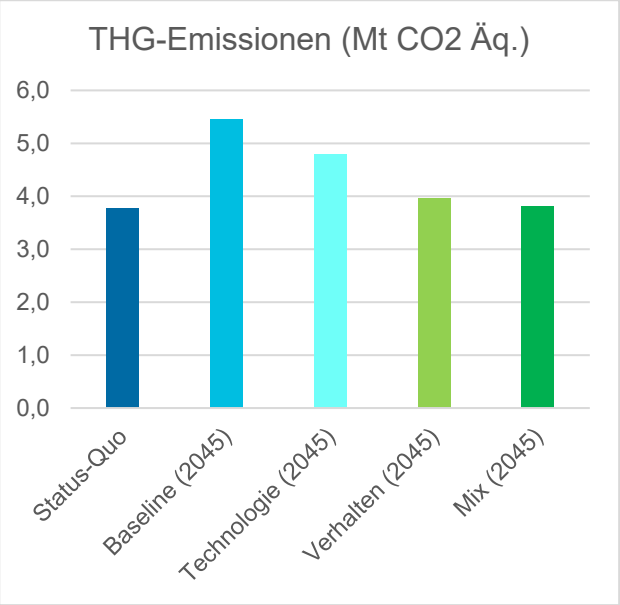
[18] Die Quelle enthält allerdings keine Angaben zu Annahmen und keine absoluten Zahlen.

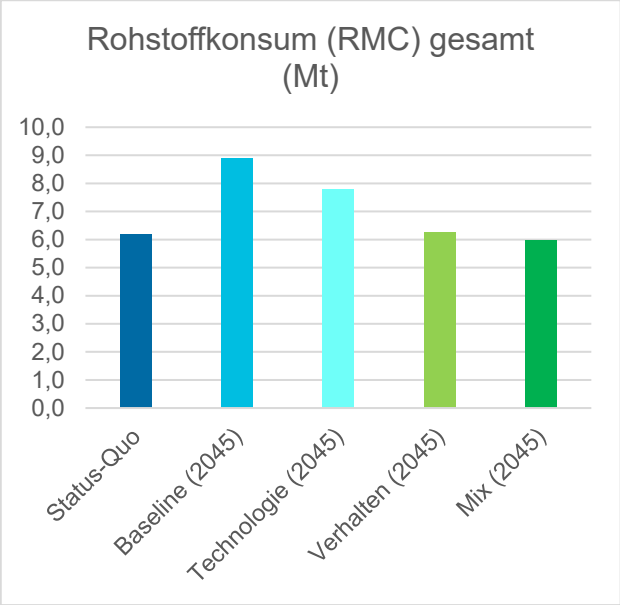
Nach dem Mix-Szenario hat das **Verhalten-Szenario** das zweithöchste Einsparpotenzial. Im Vergleich mit dem Technologie-Szenario hat das Verhalten-Szenario deswegen ein höheres Einsparpotenzial, weil die Maßnahmen so gestaltet wurden, dass der Verbrauch neuer Produkte, hier Möbel, und damit den mit der Produktion neuer Möbel verbundenen Ressourcen sinkt. Das Umweltentlastungspotenzial im Verhalten-Szenario ergibt Reduktionen der THG-Emissionen um 27 %, des RMC um 30 % und der Landnutzung um 40 % im Jahr 2045. Das **Technologie-Szenario** bietet in allen Umweltkategorien das geringste Reduktionspotenzial mit einer Verringerung der Umweltauswirkungen von 12 % bei den THG-Emissionen und beim RMC und 14 % bei der Landnutzung gegenüber der Baseline. Der Unterschied zwischen dem Einsparpotenzial im Technologie- und Verhalten-Szenario ist insbesondere bei dem Landnutzungsindikator stark ausgeprägt. Daran zeigt sich, dass die Reduktion von Produkten (Möbeln) auf dem Markt insbesondere eine Reduktion der benötigten Landfläche, hier insbesondere Wald, schafft. Nicht durch die Wirkungskategorien abgebildet, aber mit der Reduktion verbunden sind weitere Entspannung durch weniger Holzeinschlag und damit verbundener Stressreduktion auf Ökosysteme. Die positiven Effekte treten auf, wenn das Holz, das im Möbelsektor eingespart wird, nicht durch andere Branchen verwendet wird[19].

Während der Sektor-Anteil in der Detailbetrachtung der Landnutzung aufgeteilt nach Wald, Acker- und Weidefläche in den beiden letztgenannten nur einen kleinen Anteil ausmacht, entfallen für Waldfläche immerhin 10 % der Flächeneinsparpotenziale auf Möbel. Dies ist aufgrund des hohen Holzanteils in Möbeln im Allgemeinen nicht verwunderlich.

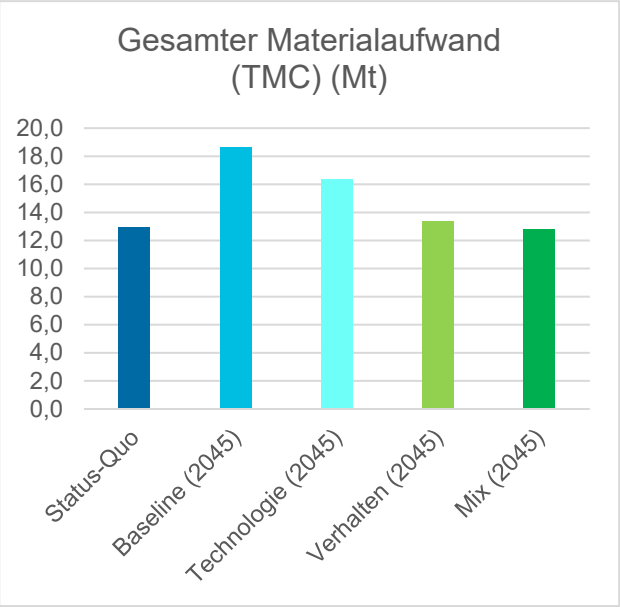
Im Vergleich der Umweltentlastungspotenziale mit den anderen Sektoren steht der Möbelsektor an drittletzter Stelle bei den THG-Emissionseinsparungen und den Landnutzungsänderungen sowie an zweitletzter Stelle beim Rohstoffkonsum. Dennoch: Seine Relevanz für die Nachfrage in Deutschland wurde in der Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022) begründet.

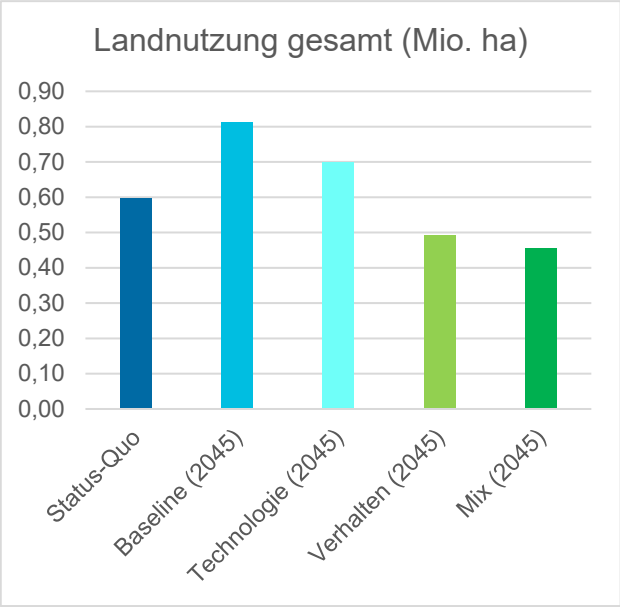
Abbildung 4-54: Vergleich der Szenarien – *Möbel*





[19] Dies gilt für alle Sektoren: Die positiven Effekte treten in dem berechneten Ausmaß immer nur dann auf, wenn die Materialien nicht anderweitig eingesetzt werden.





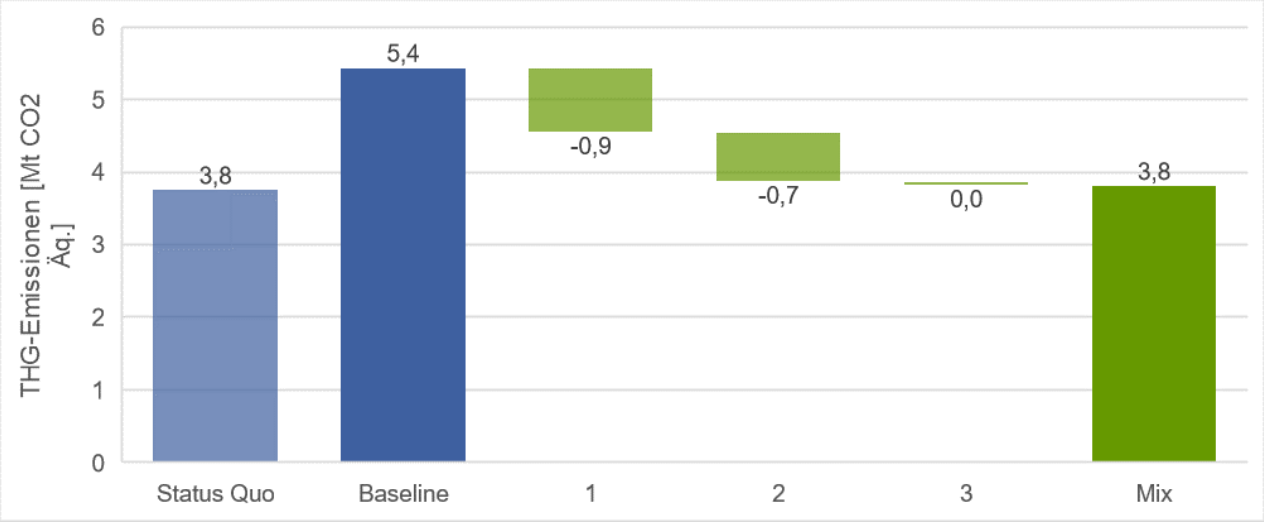
Quelle: Eigene Darstellung.

Maßnahmenvergleich

Auf der Ebene der Maßnahmen ergeben sich höchste Umweltentlastungspotenziale durch Maßnahmen 1 und 2 (eine höhere Wiederverwendung und mehr Wiederaufbereitung von Möbeln und Ökodesign für langlebige Möbel). Maßnahme 1 entspricht ein Einsparungspotenzial von 16,4 % bei THG-Emissionen (0,9 Mt CO_2-Äq), 17,6 % bei RMC (1,6 Mt) und 20,5 % bei Landnutzung (166,3 Tsd. ha). Mit Maßnahme 2 würden 12,6 % der THG-Emissionen (0,7 Mt CO_2-Äq), 12,9 % der RMC (1,1 Mt), und 13,4 % der Landnutzung (109,1 Tsd. ha.) vermieden werden. Die Umweltentlastungspotenziale durch mehr Verwendung von recyceltem Material (Maßnahme 3) sind in allen Umweltkategorien vergleichsweise gering, außer bei der Flächennutzung: In Wirkungskategorie Landnutzung ist der Rezyklateinsatz (MDCE-Maßnahme 3) entscheidender als in den anderen betrachteten Umwelt-Kategorien: Die Maßnahme macht hier immerhin knapp ein Viertel des Gesamteffekts aus, während der Rezyklateinsatz bei THG-Einsparungen und Ressourcenreduktionspotenzial nur 3 % bzw. 6 % ausmachen.

Treibhausgasemissionen

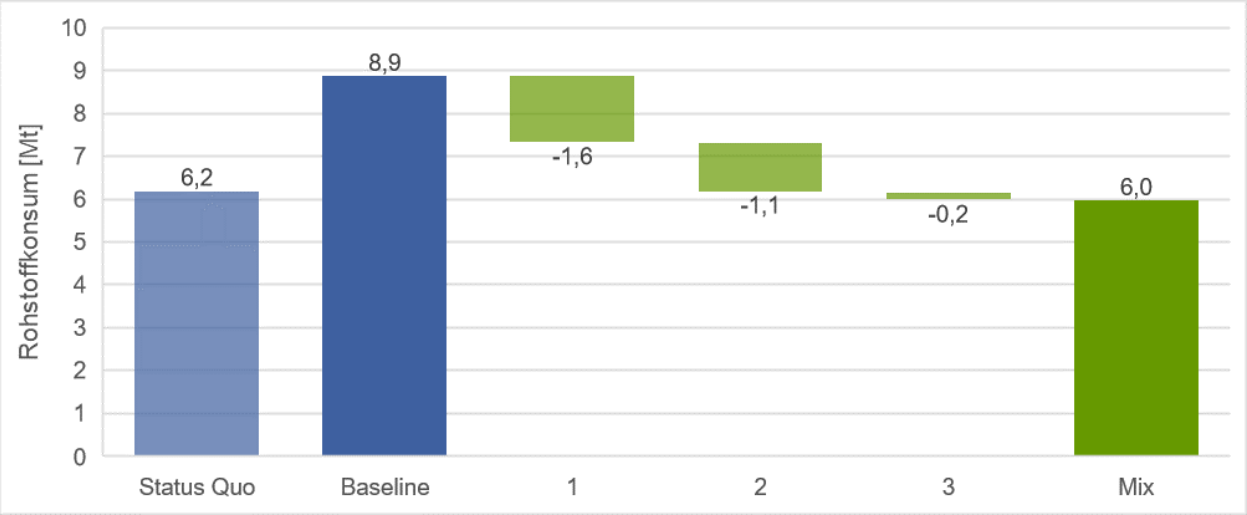
Abbildung 4-55: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Möbel*



Quelle: Eigene Darstellung.

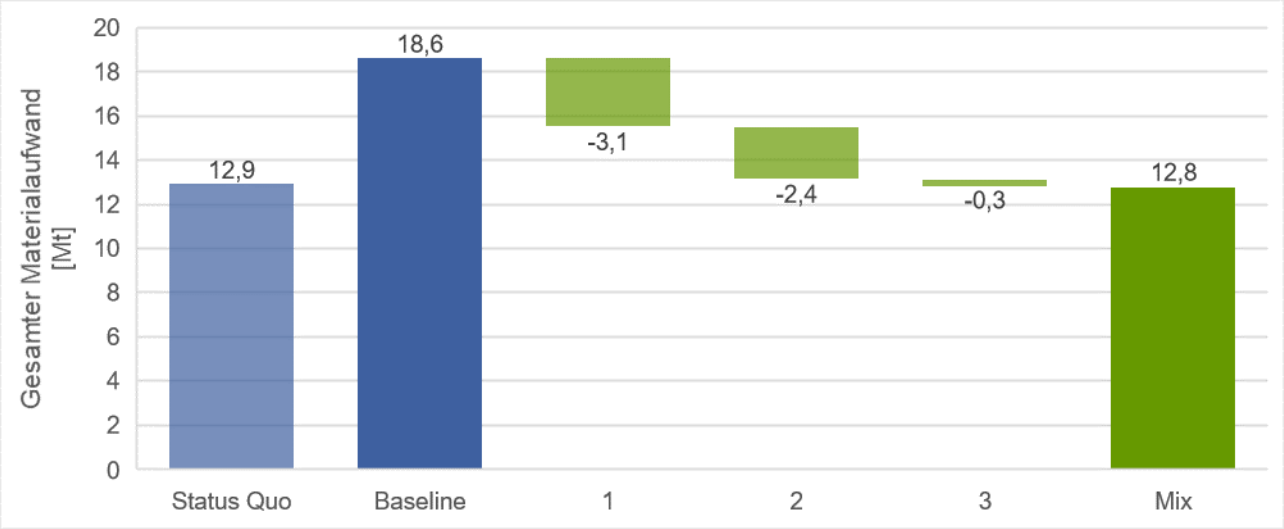
Ressourceninanspruchnahme

Abbildung 4-56: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Möbel*



Quelle: Eigene Darstellung.

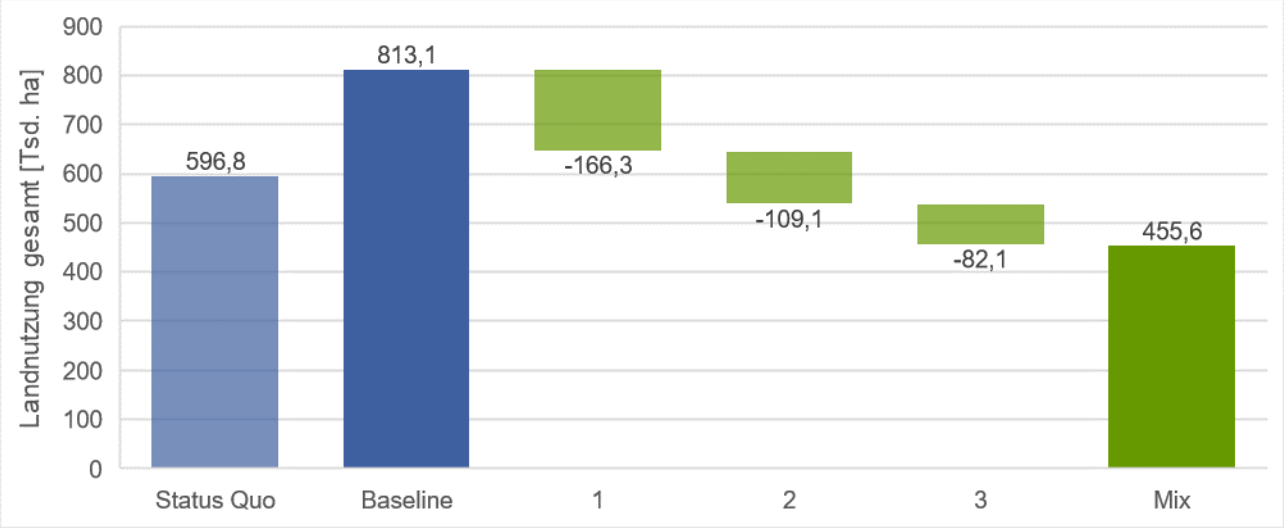
Abbildung 4-57: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Möbel*



Quelle: Eigene Darstellung.

Landnutzung

Abbildung 4-58: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Möbel*



Quelle: Eigene Darstellung.

Exkurs Biodiversität

Holz ist der wichtigste Werkstoff für Möbel. Der Blick auf den Zusammenhang zwischen Möbeln und Biodiversität schaut daher vor allem auf Waldfläche. Grundsätzlich gibt es zwei Effekte:

- Einen Druck auf die Fläche wegen gesteigertem Interesse an Holz für die stoffliche Nutzung, verbunden mit einem Verlust an Biodiversität. Dieser entsteht durch eine Übernutzung der Wälder sowie eine Umwandlung von Naturwald in Holzplantagen, wenn die Baumartenzusammensetzung

weg von einem naturbelassenen Wald, hin zu einem Reinbestand von Arten, die schnellwachsend sind, verändert wird.

- Allerdings gibt es im Zug der Klimawandelanpassung auch den gegenteiligen Effekt, wenn an Standorten mit Reinbestand eine Diversifizierung der Baumarten, z.B. Aufforstung mit (heimischem) Laubholz in Nadelwäldern, stattfindet: Was in diesem Zusammenhang die Biodiversität im Wald stärkt, ist eine Herausforderung für die Industrie, denn Hölzer verschiedener Baumarten verarbeiten sich anders. Sägewerke und Holzverarbeitung haben ihre Prozesse in den letzten Jahren jedoch auf die Verarbeitung weniger Holzarten, z.B. Fichte, optimiert. . Die Wachstumsperiode von Bäumen von 30-40 Jahren verschafft der Industrie dennoch einen zeitlichen Vorlauf, sich auf die Vielfältigkeit des Waldökosystems und an eine dem Klimawandel angepasste Bewirtschaftung der Wälder anzupassen.

Laut SITRA (2022) und EEB (2017a) sind die Steigerung der Effizienz der Möbelverarbeitung, der Langlebigkeit und des stofflichen Recyclings Hebel der Kreislaufwirtschaft, die dazu führen, dass der Bedarf an neuem Holz für Möbel im Jahr 2050 um 54 % im Vergleich zu heute sinkt. Diese Maßnahmen fokussieren auf die Gestaltung von Holzprodukten, die langlebiger sind. Eine längere Lebensdauer und Holzprodukte, die wiederverwendet, umgenutzt oder für andere Zwecke verwendet werden können. Diese Holzeinsparungen stellen zusammen mit den anderen in SITRA (2022) modellierten[20] Maßnahmen für die Forstwirtschaft global einen potenziellen Stopp des Verlusts der biologischen Vielfalt von knapp 8 % in 2050 in Summe %. Die CE-Maßnahmen mit Fokus auf Möbelkonsum in Deutschland können im Mix-Szenario 125 Tausend Hektar Waldfläche einsparen. Ein direkter Vergleich der Studien ist jedoch nicht möglich, da die Regionen, in denen Fläche frei wird nicht bekannt ist.

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Bei der Modellierung musste eine Reihe von Annahmen und Entscheidungen getroffen werden, die einen Einfluss auf die Ergebnisse haben (siehe 7.2.6):

Kennzahlen für die Entwicklung des Möbelmarktes sagen einen stark steigenden Trend für die nächsten 10 Jahre voraus (4,6 % (Statista 2022a) für den Möbelmarkt und sogar 10,2 % (Verified Market Research 2021) für Second-Hand-Möbel). Marktforschungsinstitute bestätigen den Trend: „Aufgrund der Pandemie und des Homeoffice-Trends verbrachten die Konsumenten in den Jahren 2020 und 2021 mehr Zeit zu Hause, was viele dazu veranlasste, ihre alten Möbel durch neue zu ersetzen", gleichzeitig räumten viele ihre Wohnungen, Keller und Garagen auf. Der Second Hand Markt erfuhr einen Zuwachs" (IBIS World 2022). Auch, wenn die Wachstumsraten in dieser Modellierung für den Blick nach 2045 geringer angenommen wurden (1,0 % für neue Möbel und 3,0 % für Second-Hand), ist dies der Grund für ansteigende Umweltauswirkungen im Baseline-Szenario, deren Ausmaß mit hoher Unsicherheit behaftet ist.

Für MDCE-Maßnahme 1, die neben dem verstärkten Second-Hand-Kauf auch die Reparatur und Wiederaufbereitung von Möbeln umfasst, wurde eine Wiederverwendungsquote von 10 % heute und zwischen 13 und 24 % in den Szenarien für 2045 angenommen. Damit die Möbelreparaturbetriebe und Handwerker diese Kennzahlen erreichen können, bedarf es vermutlich einer Veränderung der

[20] Modell: *Model of Agricultural Production and the Impact on the Environment (MAgPIE) + Biodiversity Intactness Index (BII).* Der BII entspricht dem durchschnittlicher Bestand an Wildtieren in einem geografischen Gebiet im Vergleich zu vormodernen Zeiten, SITRA (2022)

Branche, denn „die Branche ist stark fragmentiert und besteht aus einer Vielzahl von kleinen Unternehmen. 80,1 % der Unternehmen sind Einzelunternehmen und 31,8 % der in der Branche beschäftigten Personen sind tätige Inhaber oder unbezahlte mithelfende Familienangehörige. Im Schnitt beschäftigt jedes Unternehmen nur 3,5 Mitarbeiter." (IBIS World 2022)

Zentrale Annahmen für MDCE-Maßnahme 2 sind der Anteil von Produkten mit Ökodesign (2 % heute und zwischen 2 und 10 % in 2045) und die Lebensdauer der Produkte ohne Ökodesign (6 Jahre) und mit (12 Jahre). Hier Mittelwerte für den Markt anzunehmen, ist eine Schwierigkeit, denn die Beispiele reichen von komplett neuen Küchen auf dem Sperrmüll (in Utfeld und Kuhn 2020) bis zu antiken Möbelstücken im Familienbesitz, die langjährig weitergegeben werden.

Die Umweltentlastungspotenziale durch mehr Verwendung von recyceltem Material (Maßnahme 3) sind in allen Umweltkategorien vergleichsweise gering. Der Rezyklat-Anteil in Möbeln wird zwischen 10 % in der Baseline und 27 % im Mix-Szenario variiert[21]. Der Vergleich mit CE-Maßnahmen anderer Sektoren, die auf Sekundärrohstoffeinsatz abzielen (z.B. Maßnahme 3 bei IKT/HH-Geräte) zeigt, dass auch im Vergleich der Maßnahmen eines Sektors der Sekundärrohstoffeinsatz eine gering wirksame Maßnahme im Hinblick auf Umweltentlastungspotenziale ist.

Im Gegensatz zu anderen Sektoren, z.B. Verpackungen oder Rechenzentren bei IKT, werden für den Möbelmarkt keine wesentlichen Technologieveränderungen erwartet. Unter Umständen könnten neue Altholzsortiertechniken entstehen (Fraunhofer WKI in Utfeld und Kuhn 2020), aber dies hat vermutlich nur einen geringen Einfluss auf die Herstellung von Möbeln, die in den CE-Maßnahmen 2 und 3 im Vordergrund stehen.

Eine weitere Studie hat sich mit Auswirkungen eines zirkulären Möbelsektors beschäftigt: Der EEB (2017b) hat berechnet, dass sich mit den von ihnen definierten CE-Strategien 3,3 bis 5,7 Mt CO_2-Äq einsparen ließen. Die CE-Maßnahmen können im Mix-Szenario 2,9 Mt CO_2-Äq einsparen, das ist knapp unterhalb der Ergebnisse von EEB. Allerdings lassen sich die Ergebnisse schwierig vergleichen, da Politikpaketen für einen zirkulären Möbelsektor mit europäischen Durchschnittswerten von „Waste Management Only"[22] bis „Full Mandatory"[23] betrachtet wurden.

4.1.2.7 Beleuchtung

CE-Maßnahmen im Beleuchtungssektor

Im Sektor Beleuchtung wurden folgende CE-Maßnahmen im Hinblick auf deren ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzungen modelliert:

1. Steigerung der Sammelquote von Altlampen
2. Vermehrte stoffliche Verwertung von Altlampen
3. Materialeinsparungen in der Lampenproduktion

[21] Es wurde berücksichtigt, dass auf die gesamte Masse der Möbelstücke, die z.B. auch Vollholz und Eisenteile enthalten, vermutlich deutlich geringere Prozentsätzen für Rezyklatquoten möglich sind als für Spanplatten, für die Flamme et al. (2020) ein Potential für den Einsatz von Sekundärrohstoffen von 40 % bis 60 % schätzen.

[22] 80 % des Marktes, davon 7 % Wiederverwendung, 40 % Recycling, 43 % thermische Verwertung, 10 % Deponierung mit gemischten Haushaltsabfällen; EEB (2017b).

[23] 100 % des Marktes, davon 25 % Wiederverwendung, 45 % Recycling, 15 % thermische Verwertung, 15 % Deponierung; EEB (2017b).

4. Verzicht auf Deko-Lampen
5. Reduktion von Leuchten ohne austauschbaren Leuchtmitteln
6. Langlebiges Lampendesign
7. Beleuchtung als Dienstleistung

Die Modellierungen umfassen Gasentladungs-, und LED-Lampen. Das bedeutet es werden nur die eigentlichen Leuchtkörper, nicht aber Leuchten als Ganzes (z.B. Kronleuchter oder Tischlampen) berücksichtigt. Eine Beschreibung der Maßnahmen und deren Modellierung sowie Ausprägung in den Szenarien befinden sich im Anhang (Kapitel 7.2.7). Zentrale Daten und Annahmen für die Modellierung sind ebenfalls im Anhang (Kapitel 7.2.7) zusammenfassend dargestellt.

Szenarienvergleich

Für den Beleuchtungssektor kommt es bereits im **Baseline-Szenario** zu radikalen Veränderungen im Vergleich zum Status quo, welche die Reduktionen in den darüberhinausgehenden Szenarien in den Schatten stellen. Am stärksten fallen die Änderungen im Hinblick auf Treibhausgase und Materialverbrauch aus. Die THG-Emissionen reduzierten sich um 65 % (auf 11,7 Mt CO_2), der Rohstoffkonsum um 73 % (auf 5.380 kt) und der gesamte Materialverbrauch sogar um 81 % (auf 28.556 kt).

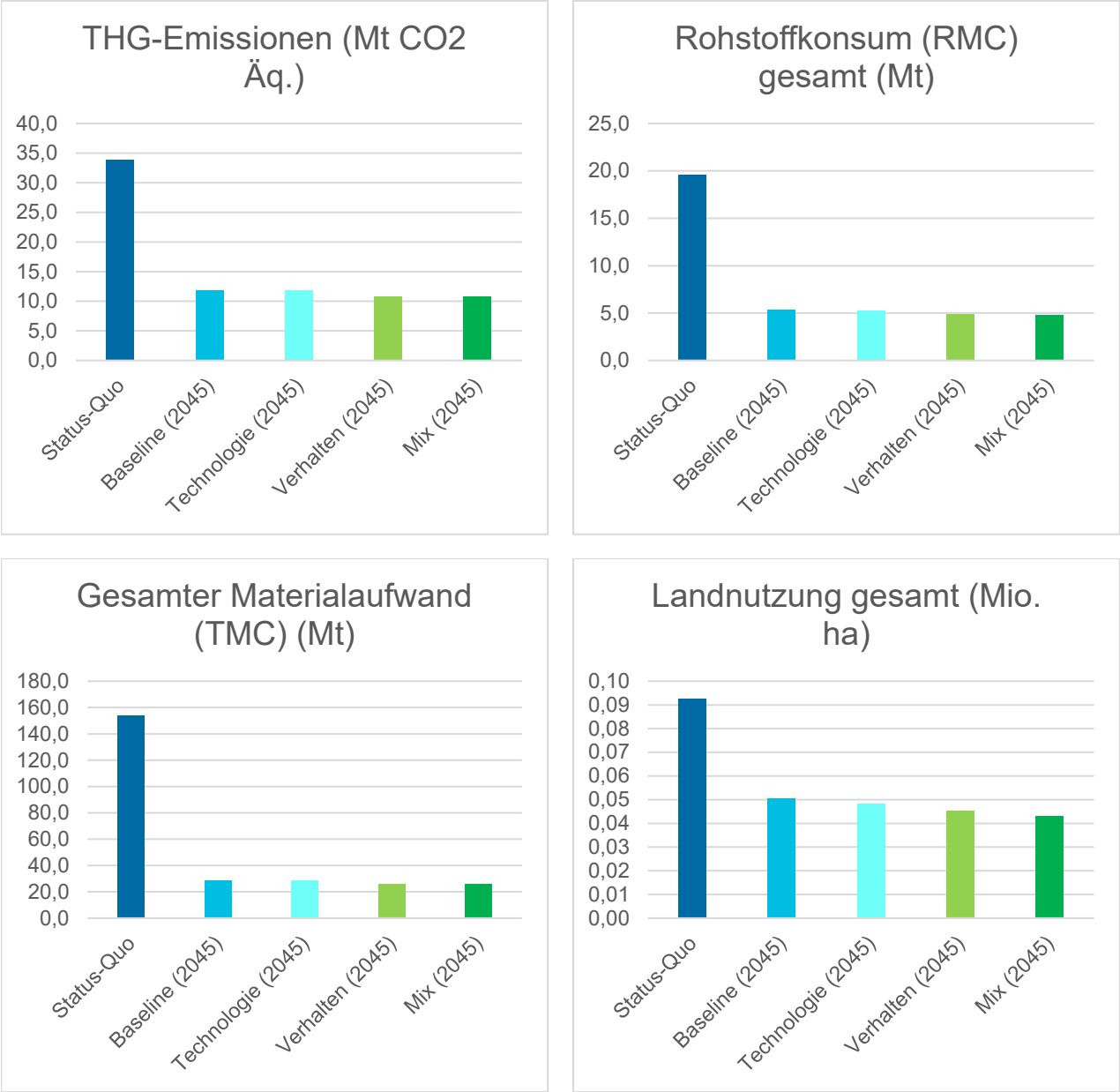
Generell sind die starken Reduktionen auf einen – bereits angelaufenen – fundamentalen technologischen Wandel in der Beleuchtungsindustrie zurückzuführen, welcher bis zum Jahr 2045 abgeschlossen sein wird. Im Zuge dieser Transformation wird ein Großteil des aktuellen Bestandes an vergleichsweise energieineffizienten Beleuchtungssystemen durch neue, effizientere LED-Lampen bzw. Systeme ersetzt. Alleine dadurch kommt es im Vergleich vom Status quo zum Baseline-Szenario zu einem um ca. 30 % verringerten Stromverbrauch. Parallel dazu ändert sich auch der Strommix bis zum Jahr 2045. Außerdem steigt der Anteil an umweltfreundlicheren, erneuerbaren Energien. Beides ist von großer Bedeutung, da in dem MRIO-Modell der überwiegende Großteil der monetären Impulse – aus denen sich die Effekte auf die Wirkkategorien ergeben – im Beleuchtungssektor auf den Stromverbrauch und nicht auf den Verbrauch von Materialien oder den Absatz von Lampen zurückzuführen sind. Für den Status quo betrugen die Kosten für den Stromverbrauch ca. 14 Mrd. €. Damit sind 95 % der für diesen Sektor berücksichtigen Umsätze auf den Energieverbrauch zurückzuführen und lediglich 5 % auf die Herstellung %. Änderungen des Stromverbrauchs und des Strommix, wie vom Status quo zum Baseline-Szenario, haben also einen großen Einfluss auf die ökologischen Wirkkategorien.

Diese Dominanz der Stromkosten ist auch der Grund dafür, dass trotz der beachtlichen Mengenänderungen von in Verkehr gebrachten und gesammelten Lampen im Technologie-, Verhalten-, und Mix-Szenario (für einen Überblick der Mengen siehe 7.2.7), sich diese Szenarien hinsichtlich ihrer ökologischen Wirkungen nur mehr vergleichsweise wenig vom Baseline-Szenario unterscheiden. Die dahinterliegende Ursache hierfür ist, dass nur eine der in den Szenarien berechneten CE-Maßnahmen Auswirkungen auf den Stromverbrauch berücksichtigt (Verzicht auf Deko-Lampen) und deswegen zu starken Änderungen führt.

Nichtsdestotrotz wird ersichtlich, dass für alle ökologischen Wirkkategorien im Mix-Szenario, dicht gefolgt vom Verhalten-Szenario die größten Reduktionen gegenüber dem Baseline-Szenario erreicht werden. Im **Mix-Szenario** können durch die modellierten Umweltwirkungen des Beleuchtungssektors wie folgt gegenüber dem Baseline-Szenario reduziert werden: Die THG-Emission sinken um 8,9 %, der Rohstoffkonsum um 10,8 %, der gesamte Materialverbrauch um 9,3 % und die Landnutzung um 14,6 %.

Im **Technologie-Szenario** können hingegen kaum noch weitere Reduktionen gegenüber dem Baseline-Szenario – in dem es ja schon zu großem technologischem Wandel gekommen ist – erreicht werden. Es mag vielleicht auf dem ersten Blick verwundern, dass es im Technologie-Szenario, bei einem Hochtechnologie-Sektor wie Beleuchtung nur zu geringen Änderungen kommt. Der Grund hierfür ist vor allem, dass es in diesem Szenario zu keiner weiteren Verringern des Stromverbrauches kommt, da hier die Maßnahme „Reduktion von Deko-Lampen“ im Technologie-Szenario nicht ausgeprägt ist.

Abbildung 4-59: Vergleich der Szenarien – *Beleuchtung*



Quelle: Eigene Darstellung.

Maßnahmenvergleich

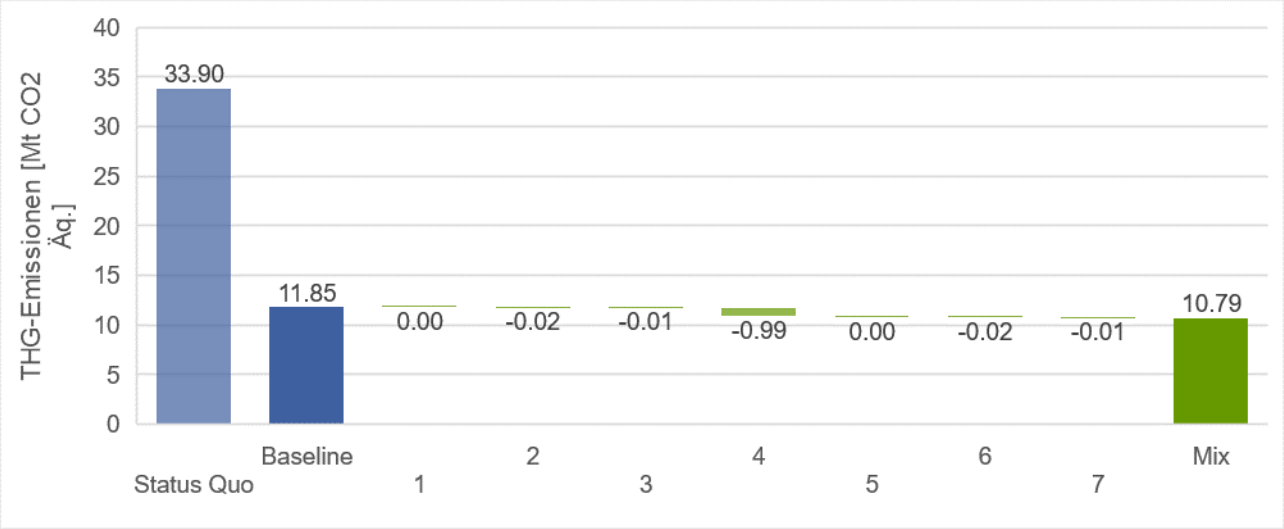
Die Maßnahmen mit den stärksten Umweltentlastungspotenzialen ist „Verzicht von Deko-Lampen". Diese Maßnahme alleine hat für alle ökologischen Indikatoren größere Auswirkungen als alle anderen CE-Maßnahmen zusammen. Dieser Effekt ist insbesondere bei den THG-Emissionen und bei gesamten Materialverbrauch ausgeprägt. Hinsichtlich ersteren macht die Reduktion der Deko-Lampen 93,5 % der zusätzlichen Reduktionen der THG-Emissionen in diesem Szenario aus (-0,99 Mt). Beim Gesamtmaterialverbrauch sind es noch 89 % (-2.375 kt). Beim Ressourcenkonsum (75 %; -440kt) und beim Landverbrauch (53 %; -3.933 ha) sind Anteile dieser Maßnahmen zwar geringer, aber immer noch dominant. Die Maßnahme alleine reduziert die vier ökologischen Indikatoren um jeweils ca. 8 %. Der Grund für die starke Reduktion ist, dass – wie oben erwähnt – die Maßnahme „Reduktion von Deko-Lampen" die einzige Maßnahme ist, die in der Modellierung zu einer Reduktion des Stromverbrauches führt und dass der Stromverbrauch für den überwiegenden Anteil der Umweltwirkungen verantwortlich ist.

Betrachtet man die Änderungen der reinen Materialströme, dann ist „Verzicht von Dekolampen" nur eine Maßnahme mit vergleichsweise geringen Effekten. Im Mix-Szenario wird etwa davon ausgegangen, dass es sich bei 17 % der in Verkehr gebrachten Menge Lampen, um Deko-Lampen handelt und dass sich dieser Anteil durch die Maßnahme um 50 % reduziert. Die daraus resultierenden Reduktionen im Lampen-Absatz bzw. der Bedarfe an Primärrohstoffe sind weit geringer jene der meisten anderen CE-Maßnahmen (siehe Anhang, 7.2.7). Die Änderung des Stromverbrauches macht hier aber den Unterschied. Die Umweltentlastungspotenziale der anderen Maßnahmen spiegeln die durch sie verursachten Änderungen der Materialströme wider. Das bedeutet, sie ergeben sich daraus, wie viel weniger Lampen durch die Maßnahme in Verkehr gebracht oder wie viel mehr Altlampen gesammelt wurden. Hier werden die größten Effekte, durch die eine Verlängerung der Lebensdauer von Lampen erzielt (Maßnahme 6), gefolgt von einer erhöhten stofflichen Verwertung von Altlampen (Maßnahme 2), Beleuchtung als Dienstleistung (Maßnahme 7), Verringerung des Materialeinsatzes in der Lampenproduktion (Maßnahme 3), vermehrte Sammlung von Altleuchten (Maßnahme 1) und Reduktion von Leuchten ohne austauschbare Leuchtmittel (Maßnahme 5).

Durch die Verlängerung der Lebensdauer müssen pro Jahr weniger Lampen ausgetauscht, um die gleiche Beleuchtungsleistung zu erreichen. Bei einer Verlängerung der angenommenen durchschnittlichen Lebensdauer von 25.000h im Baseline-Szenario 2045, auf 50.000h im Mix-Szenario ergibt sich eine Reduktion anteilige Reduktion der Mengen in Verkehr gebrachter Lampen und die damit zusammenhängenden verringerten Umsätze und Bedarfe an Rohstoffen um. Bei der zweitbedeutendsten Maßnahme „erhöhte stoffliche Verwertung wird ermöglicht, dass bestimmte Komponenten von LED-Lampen, die aktuelle wohl nur schwerer stofflich in Deutschland zu recyceln sind, durch Umrüstung der Verwertungsanlagen stofflich recycelt werden können. Dadurch können zusätzliche Altlampen einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Dies erhöht die verfügbaren Sekundärrohstoffe und verringert dadurch ebenfalls den Primärbedarf and Rohstoffen. Eine genaue Auflistung aller, durch die CE-Maßnahmen veränderten Stoffströme finden sich im Anhang (Kapitel 7.2.7)

Treibhausgasemissionen

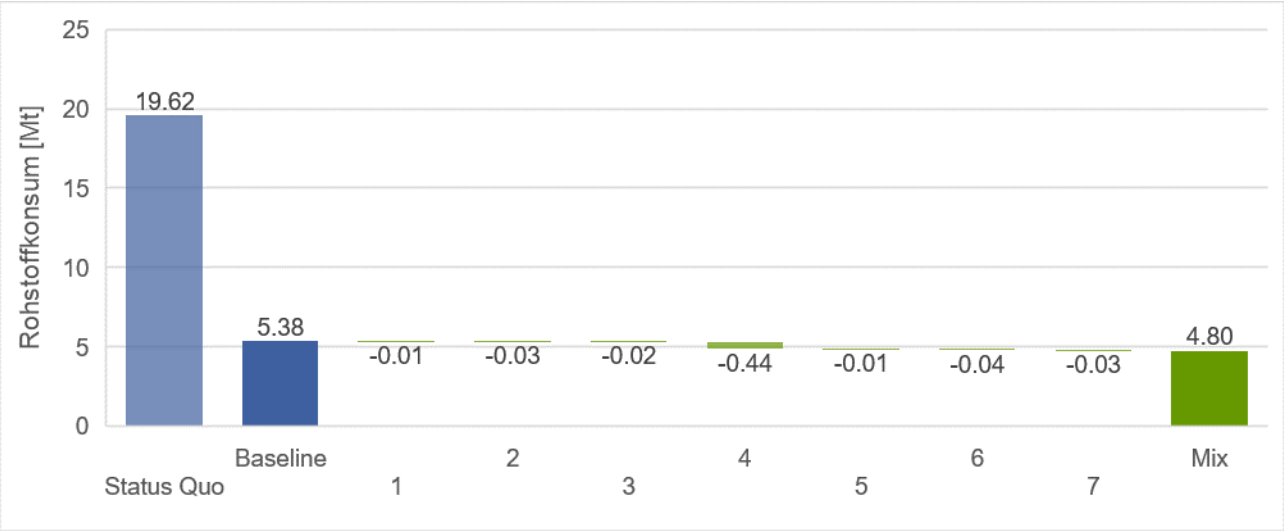
Abbildung 4-60: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Beleuchtung*



Quelle: Eigene Darstellung.

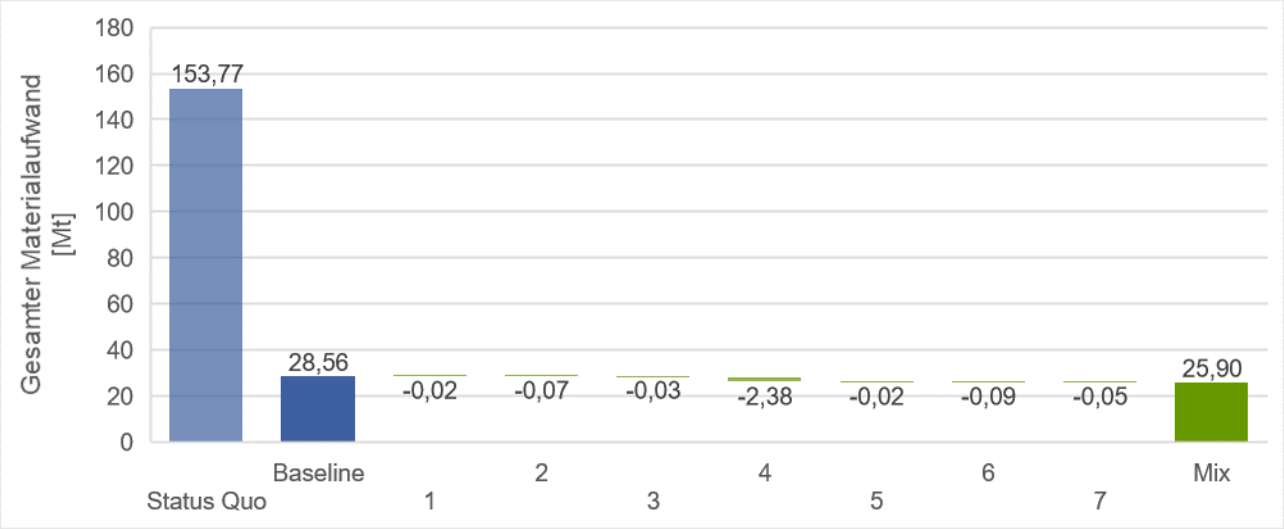
Ressourceninanspruchnahme

Abbildung 4-61: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Beleuchtung*



Quelle: Eigene Darstellung.

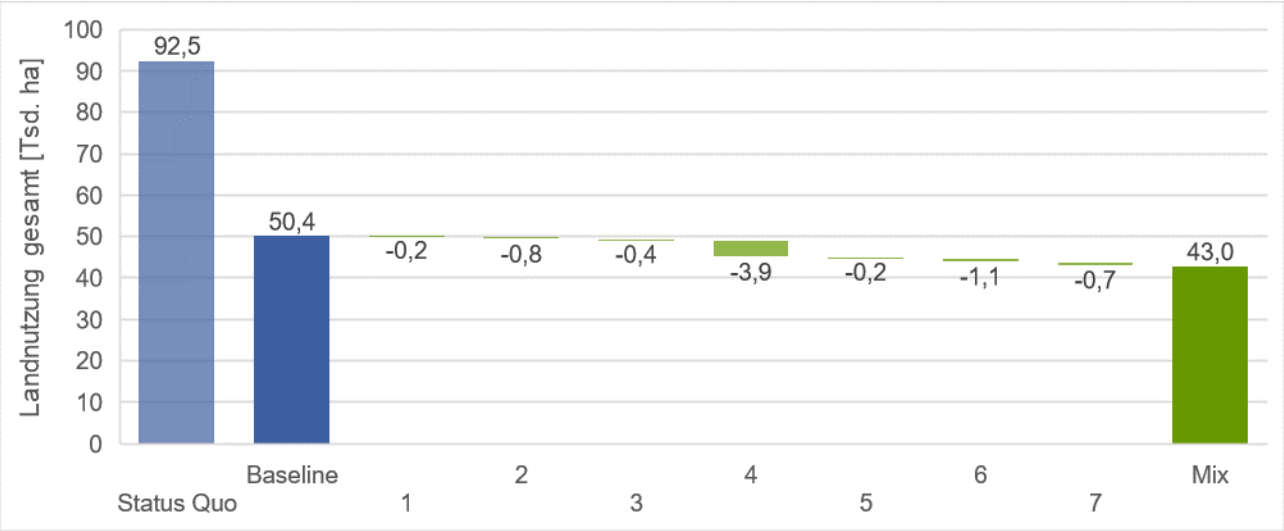
Abbildung 4-62: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Beleuchtung*



Quelle: Eigene Darstellung.

Landnutzung

Abbildung 4-63: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Beleuchtung*



Quelle: Eigene Darstellung.

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Für die Berechnungen der Wirkungen der CE-Maßnahmen im Beleuchtungssektor werden nur Lampen (d.h. die eigentlichen Leuchtmittel wie Gaskompaktlampen oder Röhrenlampen) und nicht die gesamten Leuchten (wie etwa Tischlampen oder Kronleuchter) berücksichtigt. Grundlagen der Berechnungen sind die Mengen an jährlich in Deutschland in Verkehr gebrachten, gesammelten und verwerteten Mengen, die durch die Stiftung Elektro-Altgeräte Register (Stiftung EAR) registriert werden. Die Daten zeigen also die jährlichen Wirkungen auf bestimmte ökologische Indikatoren. Hierbei

gibt es zum einen Unsicherheiten bzgl. der Kategorisierung von Elektroaltgeräten, die dazu führten, dass nur die angegebenen B2C-Mengen berücksichtigt wurden (siehe Anhang 7.2.7 für Details).

Für manche Circular-Maßnahmen musste die Stückzahl an Lampen aus den Mengen in kg, mittels Durchschnittsgewichte verschiedener Lampentypen abgeschätzt werden. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Lampenbauformen führt dies zu Unschärfen und Unsicherheiten. So wird etwa davon ausgegangen, dass im Status quo ca. 185 Mio. Lampen in Deutschland in Verkehr gebracht werden. Für das Baseline-Szenario reduziert sich dieser Wert auf ca. 145 Mio. Lampen. Ein Vergleich mit den Daten einer Studie über die Entwicklung der Beleuchtung in EU-28 im Auftrag der EU-Kommission (Kemna et al. 2015a) zeigt, dass die Stückzahlen für Deutschland wohl leicht unterschätzt werden (hier wird für Deutschland im Jahr 2020 ca. 200 Mio. Lampen geschätzt. Für Details für siehe Anhang 9.2.7.3).

Bei den Maßnahmen “langlebiges Lampendesign“, „Verzicht auf Deko-Lampen“ und “Beleuchtung als Dienstleistung” ergeben sich die monetären Impulse teilweise[24] auf Umsatzänderungen der in Verkehr gebrachten Lampen. Im Baseline-Szenario liegen die hypothetischen Umsätze aller in Verkehr gebrachter Lampen bei ca. 485 Mio. €. Dieser Wert liegt über den Schätzungen aus anderen Studien (z.B. laut GfK in UBA 2022a ca. 250 Mio. € für das Jahr 2021) und könnte somit überschätzt sein. Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass die Stückzahl in Verkehr gebrachter Lampen wohl eher unterschätzt ist. Etwaige Überschätzungen fallen nur wenig ins Gewicht, da die Wirkungen in diesem Modell generell stark durch die Kosten des Stromverbrauches bestimmt werden. Dieser beträgt im Status quo ca. 14 Mrd. € und übersteigt die monetären Impulse durch einen geänderten Absatz von Lampen oder vermehrtes Recycling bei weitem.

Die Wirkungen einzelner CE-Maßnahmen werden darüber hinaus noch dadurch unterschätzt, dass mit ihnen zusammenhängende Reduktionen des Stromverbrauchs nicht berücksichtigt wurden. Nur bei der Maßnahme „Verzicht auf Deko-Lampen“ wurde eine Reduktion des Stromverbrauches gemäß der Reduktion der Deko-Lampen im Gesamtbestand (nicht der jährliche in Verkehr gebrachten Menge) angenommen. Bei der Maßnahme “Beleuchtung als Dienstleistung” ist hingegen keine Reduktion des Stromverbrauches in die Modellierung eingeflossen. Obwohl einige Fallstudien hier ein Einsparungspotenzial von teilweise 70 % zeigen. Diese Einsparungspotenziale lassen sich aber nur erzielen, wenn sehr ineffiziente Beleuchtungssysteme umgerüstet werden (z.B. Umstieg alter Röhrenlampen auf LED-Lampen). In Zukunft wird sich dieses Einsparungspotenzial verringern. Auch wurden die Umsätze, die sich aus “Beleuchtung als Dienstleistung” für Anbieter lukrieren lassen, nicht im Modell berücksichtigt. Hier würden sich für das Mix-Szenario beispielsweise für das (unrealistische hohe) Einsparungspotenzial von 70 % laut Schätzungen Umsätze von 580 Mio. € generieren lassen (Signify Holding 2019a; 2019b). Auch wenn diese Schätzungen zu hoch sind, zeigen sie doch, dass Effekte dieser Maßnahme unterschätzt sind. Die Wirkungen einzelner CE-Maßnahmen werden darüber hinaus noch dadurch unterschätzt, dass mit ihnen zusammenhängende Reduktionen des Stromverbrauchs nicht berücksichtigt wurden. Nur bei der Maßnahme „Verzicht auf Deko-Lampen“ wurde eine Reduktion des Stromverbrauches gemäß der Reduktion der Deko-Lampen im Gesamtbestand (nicht der jährliche in Verkehr gebrachten Menge) angenommen. Bei der Maßnahme “Beleuchtung als Dienstleistung” ist hingegen keine Reduktion des Stromverbrauches in die Modellierung eingeflossen. Obwohl einige Fallstudien hier ein Einsparungspotenzialpotenzial von teilweise 70 % zeigen. Diese Einsparungspotenziale lassen sich aber nur erzielen, wenn sehr ineffiziente Beleuchtungssysteme umgerüstet werden (z.B. Umstieg alter Röhrenlampen auf LED-Lampen). In Zukunft wird sich dieses Einsparungspotenzialpotenzial verringern. Auch wurden die

[24] Bei der Maßnahme “Verzicht auf Deko-Lampen" spielt auch der reduzierte Stromverbrauch eine – dominierende – Rolle.

Umsätze, die sich aus “Beleuchtung als Dienstleistung” für Anbieter lukrieren lassen, nicht im Modell berücksichtigt. Hier würden sich für das Mix-Szenario beispielsweise für das (unrealistische hohe) Einsparungspotenzial von 70 % laut Schätzungen Umsätze von 580 Mio. € generieren lassen (Signify Holding 2019a; 2019b). Auch wenn diese Schätzungen zu hoch sind, zeigen sie doch, dass Effekte dieser Maßnahme unterschätzt sind.

Bei der Maßnahme “langlebiges Design” könnten ebenfalls Reduktionen des Stromverbrauches nicht berücksichtigt worden sein, nämlich dann, wenn eine Umrüstung auf langlebigere Lampen mit höherer Energieeffizienz der neuen Lampen einher geht. Dies ist zwar aktuell beispielsweise der Fall, wenn ineffiziente Gasentladungslampen durch LED-Lampen ersetzt werden, wie stark Energieeffizienz und Langlebigkeit allerdings im Jahr 2045 bei verschiedenen LED-Lampen zusammenhängen ist schwerer zu sagen. Wenn es zusammenhänge gibt, dann werden sie aber in den Modellierungen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus wird in dieser Maßnahme auch davon ausgegangen, dass eine Verlängerung der Lebensdauer, die Nachfrage an Lampen im gleichen Verhältnis reduziert, in dem sich die Lebensdauer erhöht. Der Grund hierfür ist, dass weniger Lampen ausgetauscht werden müssen. Was in dieser Rechnung ignoriert wird, ist das ein Teil der Nachfrage an Lampen nicht durch die Lebensdauer beeinflusst wird (z.B. beim Neubau von Gebäuden). Dementsprechend werden die teils großen Reduktionen bei Lampenzahlen hier wohl überschätzt. Wobei man allerdings beachten, muss dass sich in den Szenarien auch die Bautätigkeit stark reduziert.

Für die Aufschlüsselung der in Verkehr gebrachten und gesammelten Mengen in einzelne Materialfraktionen wurden ebenfalls durchschnittliche Anteile verbauter Materialien auf Basis verschiedener Lampenmodelle genutzt. Auch hier handelt es sich aufgrund der Vielzahl von Bauformen und Modellen um Näherungswerte.

4.1.2.8 Verpackungen

CE-Maßnahmen im Verpackungssektor

Im Sektor Verpackungen wurden CE-Maßnahmenbündel im Hinblick auf deren ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzungen modelliert.

Die Maßnahmenbündel sind:

1. Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend verhaltensbedingte Maßnahmen (kurz: verhaltensbedingte Reduktionen)
    a. Reduktion von Produktabfällen
    b. Verzicht auf ausgewählte Produkte
    c. Unverpackte Distribution
    d. Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder andere wiederverwendbare Behälter
    e. Nutzung von Nachfüllbeuteln
    f. Veränderung der Produktdarreichung
2. Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend technikbedingte Maßnahmen (kurz: technikbedingte Reduktionen)
    a. Vermeidung von Umverpackungen

b. Reduktion überdimensionierter Verpackungen

c. Vermeidung sonstiger funktionsloser Verpackungen

d. Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen

e. Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten

f. Reduktion von Verpackungsfunktionen

3. Förderung von hochwertigem[25] Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz (kurz: Recycling und Rezyklateinsatz)

a. Design-for-Recycling

b. Optimierung der Getrenntsammlung[26]

c. Steigerung von Sortier- und Recyclingeffizienzen

d. Steigerung des Einsatzes von Post-Consumer Rezyklaten[27]

Modelliert wurden Reduktionspotenziale und Steigerung der Rezyklatanteile aus werkstofflichem Post-Consumer-Recycling für Verpackungen aus privatem (Food und Non-Food in privaten Haushalten) und nicht-privatem Endverbrauch (Transport- und Umverpackungen sowie Endverbrauch in Industrie und Gewerbe).

Eine Beschreibung der Maßnahmen und deren Modellierung sowie Ausprägung in den Szenarien, einschließlich zentraler Daten und Annahmen für die Modellierung sind im Anhang (7.2.8) zusammenfassend dargestellt.

Szenarienvergleich

Die Bilanzergebnisse spiegeln zum einen die Reduktion des Produktionsaufwands, insbesondere der benötigten Materialmengen und den damit verbundenen Kosteneinsparungen bei der Verpackungsherstellung bzw. Mehraufwendungen im Handel und bei Servicedienstleistern wider. Zum anderen die vermehrte Bereitstellung und Nutzung von Post-Consumer-Rezyklaten verbunden mit Einsparungen bei der Bereitstellung von Primärressourcen.

Aktuell ist der Trend zu steigendem Verbrauch von Verpackungsmaterialien trotz der 1994 verabschiedeten Verpackungsrichtlinie 94/62/EG ungebrochen. 2006 lag das Aufkommen in der EU im Mittel noch bei 151 kg je Einwohner (Trunk 2022), im Jahr 2020 bei 180 kg. Die Werte der Einzelstaaten reichen von 66,0 kg je Einwohner in Kroatien bis 225,8 kg je Einwohner in Deutschland (Eurostat 2023b). Würden keine wirksamen Maßnahmen ergriffen werden, wäre bis 2030 mit einem Anstieg auf 209 kg je Einwohner im EU-Mittel zu rechnen (Trunk 2022). In Bezug auf Kunststoffverpackungen geht die Kommission davon aus, dass ohne weitere Maßnahmen die Mengen bis 2030

[25] Hochwertiges Recycling im Sinne des § 21 VerpackG ist eine werkstoffliche Verwertung, durch die Rezyklat erzeugt wird, das materialidentisches Primärmaterial in werkstofftypischen Anwendungen substituieren kann (Bulach et al. (2022a)).

[26] Bei der Optimierung der Getrenntsammlung von Verpackungsabfällen sind, neben der Schaffung von günstigen Voraussetzungen durch die Entsorgungsbetriebe und wirksamer Anreize durch entsprechende Anreize in den Gebührensatzungen der Kommunen, auch die Verbraucherinnen und Verbraucher gefordert, die letztendlich die Trennung durchführen müssen.

[27] Wenn im weiteren Text von Rezyklaten gesprochen wird, sind damit immer Post Consumer Rezyklate (PCR) gemeint.

um 46 % und bis 2040 um 61 % gegenüber 2018 ansteigen würden (EC 2022c). Die von der Kommission im aktuellen Entwurf einer EU-Verordnung zu Verpackungen und Verpackungsabfälle (PPWR) angedachten Regelungen sollen bis 2030 einen Rückgang auf 168 kg je Einwohner im EU-Mittel bewirken (Trunk 2022).

Für das **Baseline-Szenario** 2045 wird unterstellt, dass durch heute schon absehbare Maßnahmen auf der Basis des PPWR (vgl. z. B. EC 2022b; 2022c) auch für Deutschland der aktuelle Trend der stark zunehmenden Materialverbräuche im Verpackungssektor gebrochen werden kann und die Materialmengen gegenüber dem Status Quo konstant bleiben. Als Folge davon bleiben auch alle in Abbildung 4-64 dargestellte Ergebnisse zwischen Status Quo und Baseline gleich. Die Erfahrungen aus über 30 Jahren intensiven Bemühungen, den Verpackungsverbrauch einzuschränken zeigen, dass darüber hinaus gehenden Reduktionen auf der Basis des vorgelegten Entwurfs der Verpackungsverordnung nicht zu erwarten sind.

Im **Verhalten-Szenario** wirken ausschließlich die oben aufgeführten Maßnahmen aus dem Bündel 1 „Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend verhaltensbedingte Maßnahmen“. Eine Veränderung der Recyclingquoten oder des Rezyklateinsatzes erfolgt nicht. Durch diese Maßnahmen wird in diesem Szenario ein Rückgang des Verpackungsaufkommens um etwa 23 % erreicht. Besonders hohe Rückgänge waren in den Bereichen Flüssigkeitskarton (-68 %), Papier (-29 %) und Glas (-28 %) zu verzeichnen. Von den betrachteten Einzelmaßnahmen trug die Umstellung auf Mehrwegverpackungen, insbesondere bei Getränken, Molkereiprodukten, Speisen to go und Transportverpackungen, mit knapp 60 % zu dem Gesamtrückgang bei. Bei der Bilanz einer zunehmenden Umstellung auf Mehrwegverpackungen wurde nicht unterstellt, dass Mehrwegverpackungen immer besser als Einwegverpackungen sind. Vielmehr müssen auch Mehrwegverpackungen und -systeme optimiert werden, indem die Umlaufzahlen möglichst hoch, die Einweganteile, der Aufwand zum Spülen und die Transportentfernungen so gering wie möglich gehalten werden. Deshalb stellt die Abschätzung für die Bilanz nicht das technische Potenzial zur Umstellung auf Mehrweg dar, sondern nur das Potenzial, das unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile von Einweg- und Mehrwegsystemen als ökologisch vorteilhaft eingestuft wird (vgl. hierzu auch Cayé und Schüler 2022). Die Reduktion von Produktabfällen war mit 18 % und der Verzicht auf bestimmte Produkte mit 14 % am Rückgang der Verpackungsmaterialien beteiligt. Die höchsten Reduktionen sind mit 38 % erwartungsgemäß beim privaten Endverbrauch im Bereich Food zu erreichen. Aber auch im Bereich der gewerblichen Verpackungsmengen können 15 % der Verpackungen durch verhaltensbedingte Maßnahmen eingespart werden. Zwei Drittel der Einsparungen werden auch dort durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen erreicht, eine Maßnahme, die insbesondere auch bei Transportverpackungen hohe Potenziale aufweist (vgl. hierzu Anhang 7.2.8 und Cayé und Schüler 2022).

Im **Technologie-Szenario** kommt es zu einer Kombination von Maßnahmenbündel 2 „Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend technikbedingte Maßnahmen“ und Maßnahmenbündel 3 „Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz“. Auch in diesem Szenario müssen Verbraucherinnen und Verbraucher zum Erfolg der Maßnahmen beitragen. Beispielsweise, indem sie die Angebote der Inverkehrbringer an materialoptimierten Verpackungen und zur einfacheren Getrennthaltung von Verpackungsabfällen entsprechend nutzen. Der zusätzliche Aufwand bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern in Bezug auf die Getrenntsammlung ist jedoch so gering und durch entsprechende finanzielle Anreize begleitet, so dass die Umstellung insbesondere durch die Verpackungshersteller und -inverkehrbringer initiiert werden muss. Beim Technologie-Szenario konnte das Verpackungsaufkommen durch die technisch ausgeprägten Maßnahmen zur Reduktion des Materialeinsatzes insgesamt um etwa 7 % verringert werden. Der Rückgang der Mengen war mit 12 % im privaten Endverbrauch stärker als mit 2 % im nicht-

privaten Endverbrauch. Die höchsten Beiträge waren bei Papier, Glas und Kunststoffen zu beobachten (vgl. Abbildung 4-64).

Die beiden Szenarien Technologie und Verhalten tragen jeweils etwa in gleichem Umfang zu den Auswirkungen bei den betrachteten Kriterien bei, mit Ausnahme bei der Landnutzung. Hier ist der Beitrag des Technologie-Szenarios geringfügig höher. Bis auf die Auswirkungen in Bezug auf die Landnutzung zeigt die Synergie der CE-Maßnahmen aus dem Technik- und Verhalten-Szenario im Mix-Szenario eine höhere Wirkung als die Summe der beiden Einzelszenarien.

Zusätzlich zu den Materialeinsparungen trägt im Technologie-Szenario noch die nach konservativer Schätzung unterstellte Zunahme der Nutzung von Rezyklaten von durchschnittlich 26 % auf 32 %[28] sowie die Steigerung der mittleren Recyclingquote von 66 % (nach GVM 2022) auf 80 % (eigene Berechnungen) zur THG-Einsparung bei. Die Steigerung der Recyclingquoten trägt aus zwei Gründen zum Klimaschutz bei:

a) Die spezifischen Emissionen für die Rezyklatherstellung sind z.T. deutlich geringer als bei Primärrohstoffen,

b) Bei Kunststoffen werden die hohen Emissionen aus deren Verbrennung eingespart.

Die Steigerung des Rezyklateinsatzes bei der Herstellung von Verpackungen reduziert die THG-Emissionen aus den Verpackungsmaterialien demzufolge im Verpackungssektor selbst. Die Steigerung der Recyclingquoten führt nur für die Mengen, die als Rezyklate im Verpackungsbereich eingesetzt werden zu direkten Reduktionen in diesem Sektor. Die Rezyklate, die darüber hinaus produziert werden, wirken sich in den Sektoren aus, in denen sie eingesetzt werden, z.B. im Baubereich.

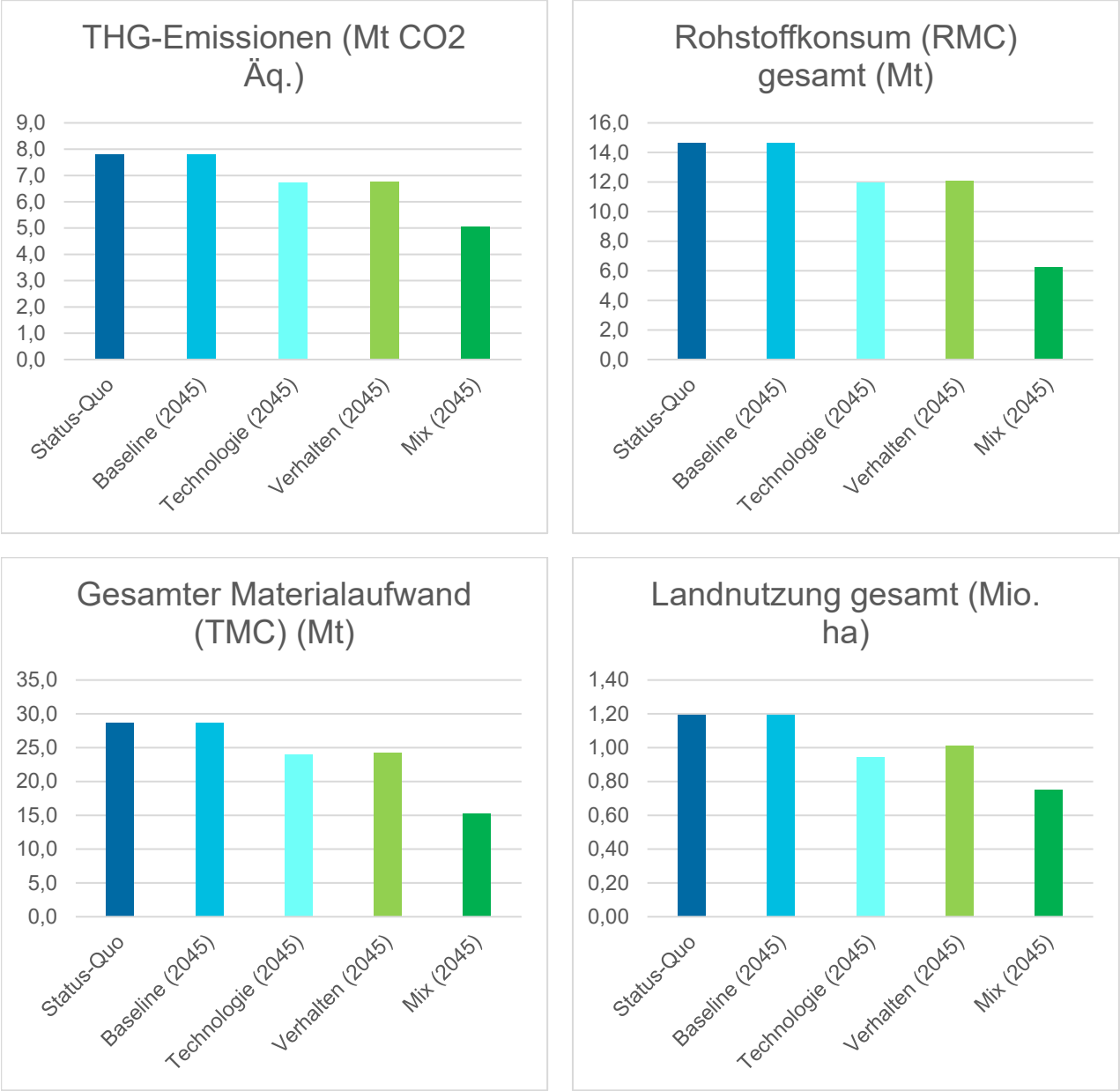
Im **Mix-Szenario** werden alle Maßnahmenbündel kombiniert eingesetzt. Die THG-Emissionen zeigen, dass in allen betrachteten Wirkungsfeldern durch die CE-Maßnahmen im Mix-Szenario ein relevanter Rückgang zum Baseline-Szenario erreicht wurde. Die Treibhausgasemissionen konnten um 35 %, die Landnutzung um 37 %, TMC um 47 % und RMC um 58 % reduziert werden[29]. Durch die Kombination aller Maßnahmen im Mix-Szenario können die THG-Emissionen gegenüber Status Quo und Baseline-Szenario um etwa 35 % reduziert werden (vgl. auch Abbildung 4-64).

Im Vergleich der Umweltindikatoren bewirken die CE-Maßnahmen mit 58 % beim Rohstoffkonsum (RMC) den deutlichsten Rückgang. Dies wird v.a. durch den geringeren Verbrauch an Verpackungsmaterialien erzielt. Da in den RMC nur der Verbrauch von Primärrohstoffen eingeht, wirken sich hier auch der höhere Rezyklateinsatz und die gesteigerten Recyclingquoten, durch den Ersatz von Primärrohstoffen gegebenenfalls an anderer Stelle, in hohem Umfang aus. Der erreichte Rückgang lag mit 47 % auch beim gesamten Materialaufwand (TMC) auf hohem Niveau, aber doch deutlich geringer als beim RMC. Das liegt unter anderem daran, dass Papier mit einem wesentlichen Beitrag zur Reduktion von RMC und TMC, tendenziell geringere Materialverluste auf dem Weg von der Rohstoffgewinnung bis zum Produkt aufweist als einige der anderen bilanzierten Verpackungsmaterialien.

Der prozentuale Rückgang der Landnutzung wird wesentlich durch die eingesparten Verpackungspapiere erreicht.

[28] Bei den Kunststoffverpackungen wird ein Anstieg des Rezyklatanteils von 10 % auf 25 % unterstellt.
[29] Die prozentualen Rückgänge beziehen sich auf die ungerundeten Bilanzergebnisse.

Abbildung 4-64: Vergleich der Szenarien – Verpackungen



Quelle: Eigene Darstellung.

Vergleich der Maßnahmenbündel

Insgesamt sind die Beiträge zur Umweltentlastung bei dem Maßnahmenbündel 1 „verhaltensbedingte Reduktionen“ bei den THG-Emissionen sowie bei den abiotischen Ressourceneinsparungen beim RMC und TMC am höchsten. Bei den biotischen Ressourceneinsparungen und bei der Landnutzung überwiegen die Beiträge aus Maßnahmenbündel 3 „Recycling und Rezyklate“.

Die Relation der Beiträge der Maßnahmenbündel 1 und 2 untereinander, die beide den Einsatz von Verpackungsmaterialien reduzieren sollen, ist an den Reduktionen der eingesetzten Verpackungsmaterialien in Tabelle 4-13 zu ersehen. Hier sind auch die wichtigsten Einzelmaßnahmen mit ihren

Beiträgen aufgelistet (vgl. hierzu auch Kapitel 7.2.8 im Anhang). Ist die gänzliche Verpackungsvermeidung nicht möglich, ist die konsequente Umstellung auf optimierte Mehrwegsysteme die mit großem Abstand effizienteste Einzelmaßnahe zur Reduktion von Verpackungsmaterialien.

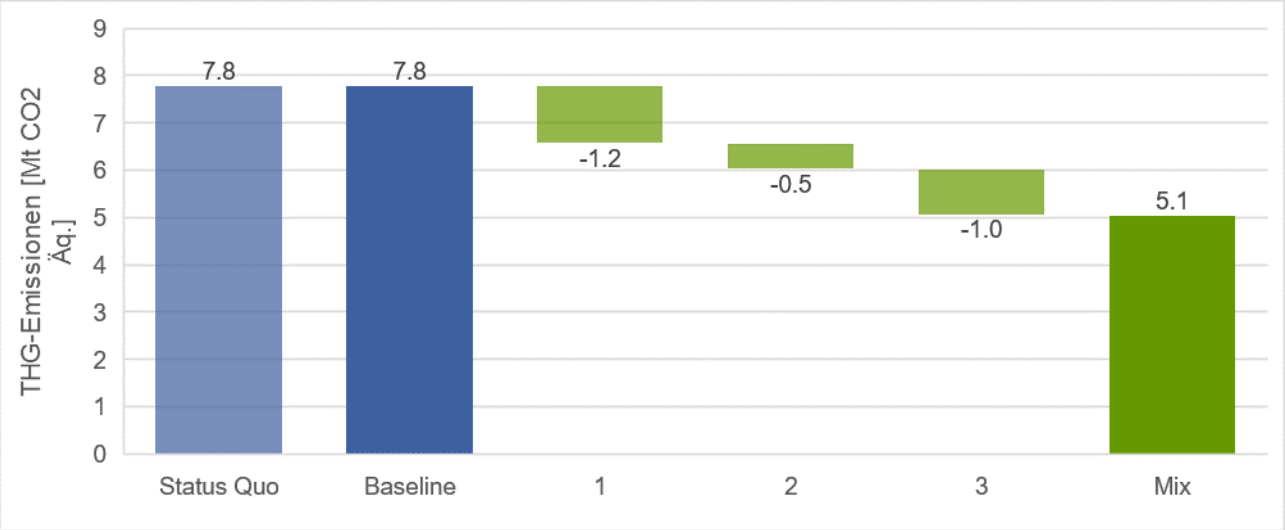
Tabelle 4-13: CE-Maßnahmen Verpackungen

Maßnahmen/-bündel	Reduktion der gesamten Materialmenge	
	1.000 t	%
Reduktion Mix-Szenario gesamt	**5.527**	**100,0 %**
Maßnahmenbündel 1: Verhaltensbedingte Reduktion	**4.280**	**77,4 %**
*ausgewiesene Einzelmaßnahmen**		
Umstellung auf Mehrweg	2.534	45,8 %
Reduktion Produktabfälle	753	13,6 %
Verzicht auf best. Produkte	585	10,6 %
sonstige	408	7,4 %
Maßnahmenbündel 2: Technikbedingte Reduktion	**1.246**	**22,5 %**
*ausgew. Einzelmaßnahmen**		
Flexible statt starrer Verp.	500	9,0 %
Reduktion Verpackungsgewichte	354	6,4 %
sonstige	392	7,1 %

Hinweis: *Prozentangaben zu Einzelmaßnahmen beziehen sich auf die Reduktion Szenario Mix gesamt
Quelle: Eigene Berechnung

Treibhausgasemissionen

Abbildung 4-65: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – Verpackungen



Quelle: Eigene Darstellung.

Bei den beiden Maßnahmenbündeln, die auf die Reduktion des Materialeinsatzes abzielen, wurden die Recyclingbemühungen und der Rezyklateinsatz nicht gesteigert. Infolge der geringeren Materialmengen, die insgesamt eingesetzt werden, gehen anteilig auch die eingesetzten Rezyklatmengen zurück, genauso wie die Mengen, die für das Recycling zur Verfügung stehen. Durch diese Festle-

gung werden die Erfolge durch die Materialeinsparungen z.T. wieder reduziert. Unter diesen Rahmenbedingungen trägt das Maßnahmenbündel 1 „verhaltensbedingte Reduktionen“ mit 45 % und Maßnahmenbündel 2 „technikbedingte Reduktionen“ mit 20 % zu den gesamten Einsparungen von 2,7 Mio. t CO2-Äkquivalenten bei den Treibhausgasemissionen bei. Das Maßnahmenbündel 3 „Recycling und Rezyklateinsatz“ ist für die verbleibenden 35 % der insgesamt erzielten Reduzierungen der Treibhausgase verantwortlich. Das zeigt, dass die Maßnahmen zur Vermeidung der Verpackungsabfälle durch die Optimierungen beim Recycling und vermehrten Rezyklateinsatz nicht ersetzt werden können, auch wenn diese mit mehr als einem Drittel einen relevanten Beitrag leisten.[30]

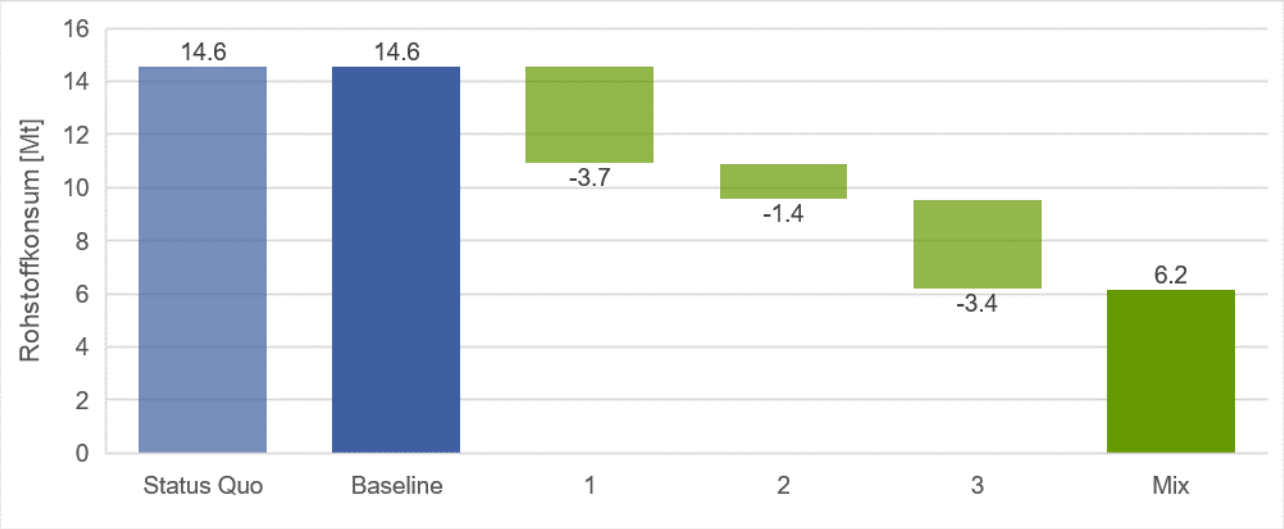
Ressourceninanspruchnahme

Zu den Einsparungen beim Rohstoffkonsum trägt Maßnahmenbündel 1 „verhaltensbedingte Reduktionen“ zu 44 %, Maßnahmenbündel 2 „technikbedingte Reduktionen“ zu 16 % und MB 3 „Recycling und Rezyklateinsatz“ zu 40 % bei.

Bezüglich der biotischen Rohstoffe liegt der Anteil von MB 3 mit 49 % besonders hoch. Das ist insbesondere auf die Steigerungen beim Recycling von Papier- und Holzverpackungen zurückzuführen. Bei den abiotischen Rohstoffen liegt der Anteil von MB 3 an den gesamten Reduktionen bei 38 %.

Ähnliche Verteilungen zwischen den einzelnen Maßnahmenbündeln zeigt sich bei den Einsparungen im gesamten Materialbedarf (TMC). Hier tragen MB 1 und MB 3 jeweils mit einem Anteil von 41 % bei. Beim biotischen Anteil des gesamten Materialbedarf steigt der Beitrag von MB 3 auf 50 %, der von MB 1 liegt noch bei 37 %.

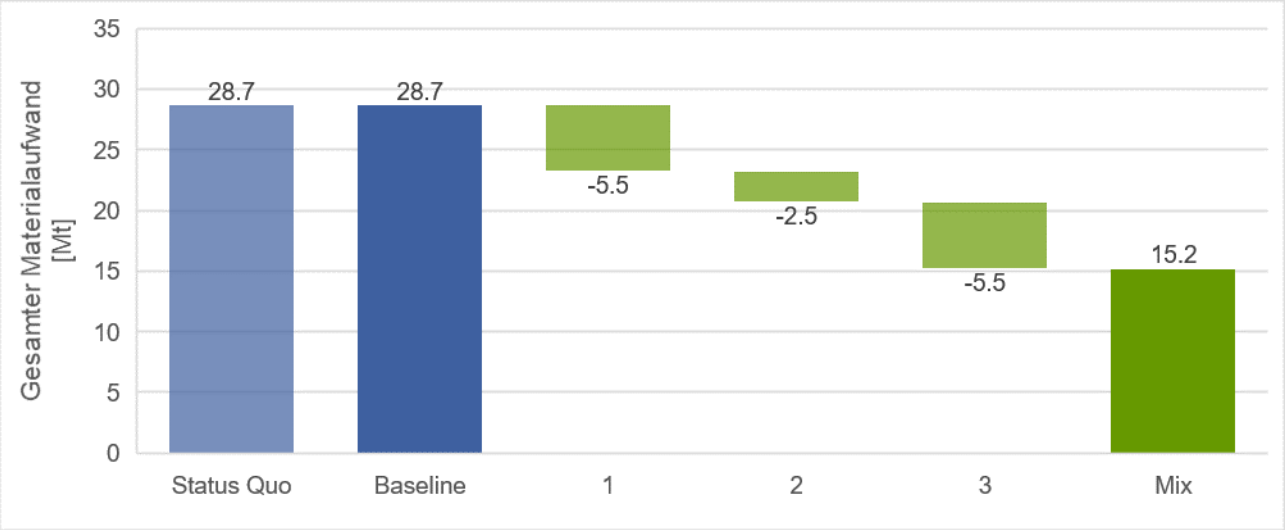
Abbildung 4-66: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – Verpackungen



Quelle: Eigene Darstellung.

[30] Werden die Materialeinsparungen separat bilanziert und für Recycling und Rezyklateinsatz nur die verbleibenden Mengen nach der Reduktion berücksichtigt, trägt MB 1 „verhaltensbedingte Reduktionen“ zu etwa 58 %, MB 2 „technikbedingte Reduktionen“ zu etwa 20 % und MB 3 „Recycling und Rezyklateinsatz“ zu etwa 22 % zu den Gesamteinsparungen bei.

Abbildung 4-67: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – Verpackungen

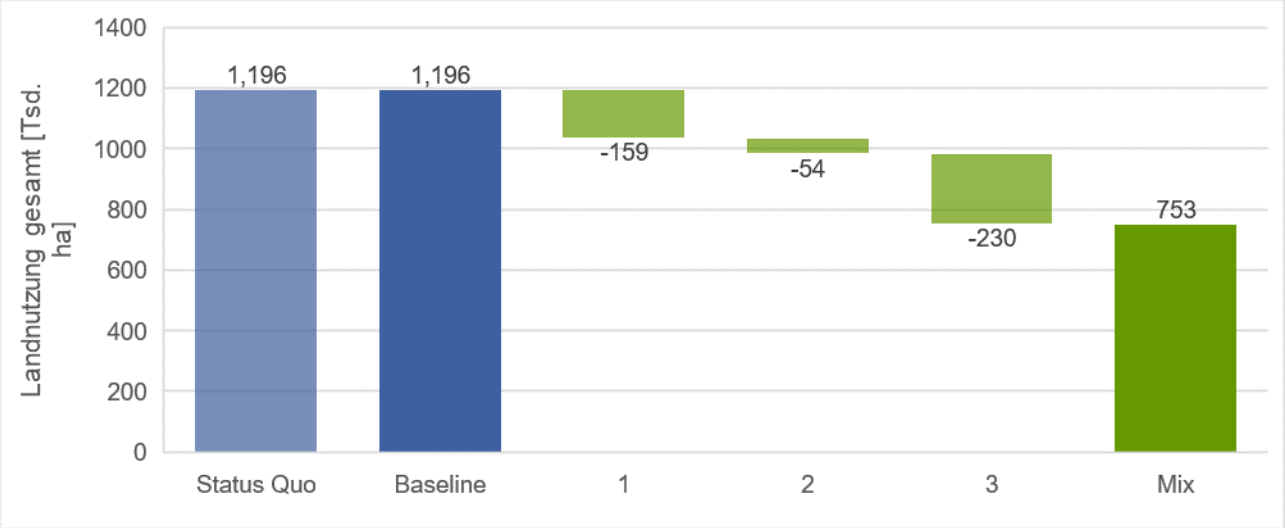


Quelle: Eigene Darstellung

Landnutzung

Wie zu erwarten, wirken sich die Beiträge bei den biotischen Rohstoffen besonders auf den Indikator Landnutzung aus. Da sie insbesondere durch gesteigerte Bemühungen zum Recycling und Rezyklateinsatz von Holz und Papier begründet sind, ist die Auswirkung besonders ausgeprägt in Bezug auf die Nutzung von Waldflächen. Hier liegt der Beitrag von MB 3 an den Gesamteinsparungen von 443.000 ha bei 59 %. MB 1 trägt mit 31 %, MB 2 mit 10 % bei. Der Beitrag zur Reduktion der Landnutzung bei Acker- und Weideflächen durch MB 1 liegt bei 50 %, durch MB 2 bei 20 % und bei MB 3 bei 30 %.

Abbildung 4-68: Landnutzung (Mix-Szenario) – Verpackungen



Quelle: Eigene Darstellung

Einordnung der Ergebnisse und Datenunsicherheiten

Da die Bilanzen im Wesentlichen auf den Veränderungen der Finanzströme basieren (siehe 3.5.2) hängen die Ergebnisse neben den validen Daten zu den Materialmengen und Recyclingquoten in relevantem Umfang von den wirtschaftlichen Daten der Verpackungsbranche ab. Die Datenlage zu Kosten und Preisen der Verpackungsmaterialien, der Produktion der Verpackungen sowie deren Transport ist insgesamt sehr unvollständig und unsicher. Das Gleiche gilt für die Kosten der CE-Maßnahmen. Als Einsparungen werden ausschließlich die reduzierten Materialkosten, nicht aber Produktionskosten für die Herstellung der Verpackungen abgesetzt. Die eingesparten Gelder müssen in den Bereichen Handel, Logistik von Mehrwegbehältnissen und sonstigen Dienstleistungen eingesetzt werden, um den höheren Personalbedarf in diesen Bereichen zu finanzieren.

Neben den Materialmengen und Kosten als Eingangsparameter für die Modellierung in Exiobase wurden zur Validierung der entsprechenden Modellergebnisse auch die THG-Emissionen auf der Basis von Emissionsfaktoren für CO_2-Äquivalenten der Verpackungsmaterialien grob hochgerechnet. Für die THG-Emissionen aus der Produktion der Verpackungen wurden pauschal Aufschläge in Abhängigkeit der Materialien angesetzt. Dabei wurde unterstellt, dass die Einsparungen in der Logistik der eingesparten Materialien und Verpackungen über die Summe der Maßnahmen etwa in der gleichen Größenordnung liegen, wie die Mehraufwendungen für den Transport und die Reinigung von Mehrwegbehältnissen. Bei diesen Hochrechnungen waren die THG-Emissionen im Status Quo und im Baseline-Szenario ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Verpackungsproduktion mit etwa 17 Mt CO_2-Äq etwa doppelt so hoch, wie bei der Modellierung in Exiobase. Nach Abzug der Gutschriften für die bereitgestellten Rezyklate aus dem Recycling von Verpackungen verblieben Emissionen von etwa 10 Mt CO_2-Äq. Würde man dann noch die in der Hochrechnung angesetzten Aufschläge für die Produktion der Verpackungen einbeziehen, lägen THG-Emissionen aus dem Sektor Verpackungen im Baseline-Szenario auf Basis der Hochrechnungen bei 13 Mt CO_2. Da die Produktionskosten in Exiobase nicht einbezogen werden konnten, zeigt sich für das Baseline-Szenario eine relativ gute Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den hochgerechneten Daten zu den THG-Emissionen. Die erreichten Reduktionen bei den THG-Emissionen im Mix-Szenario gegenüber dem Baseline-Szenario lagen in den Hochrechnungen ebenfalls bei 35 %, allerdings war die absolute Einsparung in Bezug auf die doppelte Ausgangsmenge mit 6 Mt CO_2-Äq ebenfalls doppelt so hoch. Unter Berücksichtigung der Gutschriften aus der Bereitstellung von Rezyklaten aus dem Verpackungsrecycling wurde in der Hochrechnung eine Reduktion von 37 % oder 6,3 Mt CO_2-Äq ermittelt.

<u>Hinweise zur Berücksichtigung chemischer Recyclingverfahren</u>

Einige Verfahren des chemischen Recyclings werden heute schon mit Erfolg eingesetzt oder zumindest mit guten Erfolgsaussichten getestet. Dabei handelt es sich insbesondere um Verfahren zur Depolymerisation mit dem Ziel, definierte Monomere für die weitere Verarbeitung zu gewinnen. Verfahren dieser Art werden z.B. beim Recycling von Matratzen (Polyurethan), Textilien (Polyester) und ähnlichen Materialien eingesetzt. Im Bereich der Polyolefine, die den Hauptteil der Verpackungskunststoffe ausmachen, wird v.a. der Einsatz der thermisch-chemischen Verfahren Pyrolyse und Vergasung diskutiert. Die Rolle des thermisch-chemischen Recyclings von Kunststoffen in den nächsten Jahrzehnten ist derzeit schwer vorherzusehen und deshalb kaum in den Modellierungen zu berücksichtigen. Die chemische Industrie setzt insbesondere auf die Pyrolyse von Kunststoffen und den Ersatz des Rohstoffs Naphta in der Produktionslinie von Primärkunststoffen. Bisher wurden keine prüfbaren Daten vorgelegt, die zeigen, dass die Pyrolyse von Kunststoffabfällen zu Produkten führt, deren Schadstoffbelastung aus toxikologischer Sicht einen unbedenklichen Einsatz in der Kunststoffproduktion erlaubt. Erfahrungen zur Abfallpyrolyse, die ab den 70er Jahren des letzten

Jahrhunderts zahlreich gesammelt wurden, legen nahe, dass, je nach Zusammensetzung der Inputmaterialien, Belastungen der Kokse, Öle und Kondensate aus der Pyrolyse, z.B. durch polyzyklische aromatische oder polyhalogenierte Kohlenwasserstoffe, nicht auszuschließen sind (vgl. z.B. Seitz et al. 2020).

Auch zur Ausbeute und dem energetischen Wirkungsgrad der Gesamtkette aus Pyrolyse, Aufbereitung der Pyrolyseöle und dem Einsatz im Steamcracker, insbesondere bei relevanten Einsatzmengen in Relation zu der Primärroute, liegen keine nachvollziehbaren Daten aus Anlagen im Normalbetrieb oder Großversuchen mit aussagefähigen Durchsatzmengen vor. Davon unabhängig bleibt als grundsätzliches Dilemma, dass die ohnehin teure und bezüglich der CO_2 und Energiebilanz relativ ineffiziente Recyclingroute über das thermisch-chemische Recycling umso ineffizienter wird, je weniger Polyolefine die Abfallfraktion enthält. Diese sind aber in der Regel auch gut und deutlich effizienter mechanisch zu recyceln. Würden dieser Weg davon unabhängig, als Alternative für technisch aufwendige und teure mechanische Recyclingverfahren eingesetzt werden, würde sich die Umweltbilanz verschlechtern. Grund hierfür ist, dass mit diesem Weg nur ein kleiner Teil des Produktionsweges von Primärkunststoffen ersetzt werden kann, die Energieaufwendungen dafür hoch sind und Wirkungsgrade des thermisch-chemischen Recyclings niedrig sind.

Gelingt es, diese thermische Variante, evtl. ergänzt um Vergasungstechnologien, als Konkurrenz zur Abfallverbrennung der Kunststoffverpackungen und anderer Kunststoffe zu etablieren, wäre damit eine Verbesserung der Umweltauswirkungen verbunden. Allerdings ist zu beachten, dass in unserer Modellierung eine vollständige oder zumindest weitestgehende Ausschöpfung der Potenziale des Design-for-Recycling und ein zügiger Ausbau der Infrastruktur für mechanisches Recycling unter Berücksichtigung neuer Verfahren, auch für Stoffgemische unterstellt wird. Das Gleiche gilt für physikalische und stofflich-chemische Recyclingverfahren, in denen gezielt Möglichkeiten des Lösemitteleinsatzes, der Solvolyse und anderer Verfahren zur Depolymerisation von Kunststoffen genutzt werden. Demzufolge sind die Stoffmengen, die für die Kombination aus Pyrolyse und Steamcracker bleiben werden, begrenzt.

Würden entsprechende Mengen für chemisches Recycling in der Bilanz berücksichtigt, wäre der Einfluss auf das Endergebnis vernachlässigbar.

4.2 Kritikalität: Änderung im Bedarf bzw. Bereitstellung kritischer und stark umweltbelastender Rohstoffe

Im Rahmen dieser Studie wurden die Modellierungsergebnisse für CE-Maßnahmen und -Szenarien in sieben der neun Sektoren[31] auf ihre Wirkung auf die Versorgungssicherheit hin untersucht. Es wurde eine Einschätzung der potenziellen Effekte vom Zusammenspiel der betrachteten CE-Maßnahmen anhand eines Veränderungspotenzials sowohl des Rohstoffbedarfes (Bedarfsminderungsmaßnahmen) als auch vom Rohstoffangebot (Maßnahmen zur Bereitstellung und Nutzung von Sekundärrohstoffen) erarbeitet. Somit liefert die Quantifizierung Einsichten zur Rohstoffdimension der Circular Economy unter Berücksichtigung von Angebot- und Nachfrageaspekte, sofern diese durch CE-Maßnahmen tangiert werden.

[31] Hoch- und Tiefbau wurden für die Kritikalitätsbewertung zusammengelegt. Der Textilsektor ist für keinen der 43 in dieser Studie betrachteten Rohstoffe ein mengenmäßig relevanter Anwendungsbereich.

Die Implementierung der vorgestellten CE-Maßnahmen führt zu Einsparungen im Bedarf bzw. zu einem erhöhten (potenziell lokalen) Angebot an kritischen Rohstoffen und Rohstoffen, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. Das Ziel der Rohstoffbilanzierung im Rahmen dieser Studie ist es abzuschätzen,

a) welcher Anteil an den Gesamtbedarfen Deutschlands an ausgewählten Rohstoffen durch Einsparungen oder Mehrangebot abgedeckt werden kann, ausgedrückt durch das Veränderungspotenzial (VP in %); und

b) für wie viele (X) der für die jeweiligen Sektoren relevanten Rohstoffe (Y) eine deutliche Entspannung der Versorgungslage mit Veränderungspotenzialen von ≥ +5 % erreicht werden kann, ausgedrückt durch die Kennzahl X/Y.

Dabei sind bedeutende technologische Transformationen wie die zur E-Mobilität oder der vorwiegenden Nutzung von LED-Leuchten berücksichtigt.

4.2.1 Gesamtüberblick

Übergreifende Ergebnisse

Da im Baseline-Szenario weitgehend die Entwicklung des Projektionsberichts 2021 (Repenning et al. 2021) angenommen werden, bedeutet dies, dass sowohl produktions- als auch konsumseitig lediglich bereits angekündete Maßnahmen umgesetzt werden. Die Veränderungen, die im Baseline-Szenario ohne die Umsetzung zusätzlicher CE-Maßnahmen erwartet werden, werden – wie in 3.5.6 beschrieben – als Veränderungspotenziale gegenüber dem Status quo angegeben. Aus diesen Veränderungspotenzialen ergeben sich die für 2045 erwarteten Rohstoffbedarfe.

Im **Vergleich der Baseline mit dem Status quo** (Tabelle 4-14) ergeben sich besonders für Kobalt, Dysprosium, Neodym, Praseodym und Terbium erhebliche Mehrbedarfe. Diese entstehen aus dem bereits eingeleiteten und weiter voranschreitenden Umstieg zu einer komplett elektrischen PKW-Flotte. Gleichzeitig entspannt sich die Versorgungslage folgender Rohstoffe bereits in der Baseline deutlich: Palladium, Rhodium, Platin, Cer, Europium, Gold, Yttrium und Phosphate. Für die erste Gruppe an Rohstoffen (Palladium, Rhodium, Platin, Cer) ist dies auf eine Bedarfsreduktion durch die nicht mehr für Verbrennungsmotoren gebrauchten Katalysatoren zurückzuführen. Im Beleuchtungssektor wird von einer längeren Lebensdauer von Leuchtmitteln ausgegangen, was den Bedarf an Europium und Yttrium reduziert. Gold wird vermehrt aus IKT recycelt und der Bedarf an Düngemitteln und somit Phosphat reduziert sich durch den fortgesetzten Trend der pflanzenbasierten Ernährung.

Wechselt man in die Sektorperspektive, dann spannt sich also die Versorgungslage im Fahrzeugsektor bis 2045 (Baseline) durch den Rohstoffbedarf der Batterien aber insbesondere der Permanentmagnete stark an. Im Gegenzug entspannt sich die Versorgungslage am deutlichsten für die Sektoren IKT- und Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Ernährung durch die oben genannten Trends zu mehr WEEE-Recycling, haltbareren Leuchtmitteln (LED) und pflanzenbasierter Ernährung. Geringere Änderungen in der Versorgungslage werden für die Sektoren Bau, Möbel und Verpackungen erwartet. Siehe dazu auch „Synthese der Rohstoffbilanzierung“ im weiteren Verlauf des Kapitels.

Tabelle 4-14: Rohstoffe mit den größten Veränderungen in der Versorgungslage (Anspannung oben, Entspannung unten) in der Baseline in 2045 im Vergleich mit heute (Status quo)

Rohstoffe mit erheblichem **Mehrbedarf** im Baseline-Szenario (2045) gegenüber dem Status quo	Anteil heute, den die MDCE-Sektoren nachfragen (=Sektoranteil)	Veränderungspotenzial Baseline (2045) gegenüber Status quo [Faktor der Bedarfsveränderung, gerundet]	Veränderungspotenzial im Mix-Szenario gegenüber der Baseline (2045)	MDCE-Sektor, in dem der Rohstoff besonders relevant ist
Dysprosium	66 %	-601 % [x7]	+79 %	Fahrzeuge
Neodym	43 %	-260 % [x3,5]	+67 %	Fahrzeuge
Terbium	22 %	-200 % [x3]	+61 %	Fahrzeuge
Praseodym	21 %	-146 % [x2,5]	+55 %	Fahrzeuge
Kobalt	15 %	-113 % [x2],	+60 %	Fahrzeuge und Batterien
Kupfer	65 %	-108 % [x2]	+57 %	Fahrzeuge und Batterien
Nickel	18 %	-63 % [x1,5]	+48 %	Fahrzeuge und Batterien

Hinweis: Positive Veränderungspotenziale entsprechen einer Einsparung, Bedarfsreduktion, oder einem lokalen Mehrangebot an Sekundärrohstoff, also einer Entspannung der Versorgungslage. Negative Veränderungspotenziale entsprechen einem Mehrbedarf, also einer Verschärfung der Versorgungslage. Ein Veränderungspotenzial von -100 % entspricht einem Mehrbedarf von 100 % % und somit einer Verdoppelung des Bedarfs. Ein Veränderungspotenzial von -600 % entspricht einem Mehrbedarf von 600 % und somit einer Versiebenfachung des Bedarfs usw.

Rohstoffe mit erheblichem Nachfragerückgang im Baseline-Szenario (2045) gegenüber dem Status quo	**Anteil heute, den die MDCE-Sektoren nachfragen**	**Veränderungspotenzial Baseline (2045) gegenüber Status quo**	**Veränderungspotenzial im Mix-Szenario gegenüber der Baseline (2045)**	**MDCE-Sektor, in dem der Rohstoff 2045 besonders relevant ist**
Palladium	91 %	+96 %	+133 %	IKT- & HH-Geräte
Rhodium	84 %	+84 %	0	n/v
Platin	78 %	+77 %	+2 %	IKT- & HH-Geräte
Cer	54 %	+36 %	+11 %	IKT- & HH-Geräte
Europium	100 %	+31 %	+3 %	Beleuchtung
Gold	8 %	+28 %	+19 %	IKT- & HH-Geräte
Yttrium	64 %	+15 %	+90 %	Beleuchtung
Phosphate	93 %	+10 %	+17 %	Ernährung

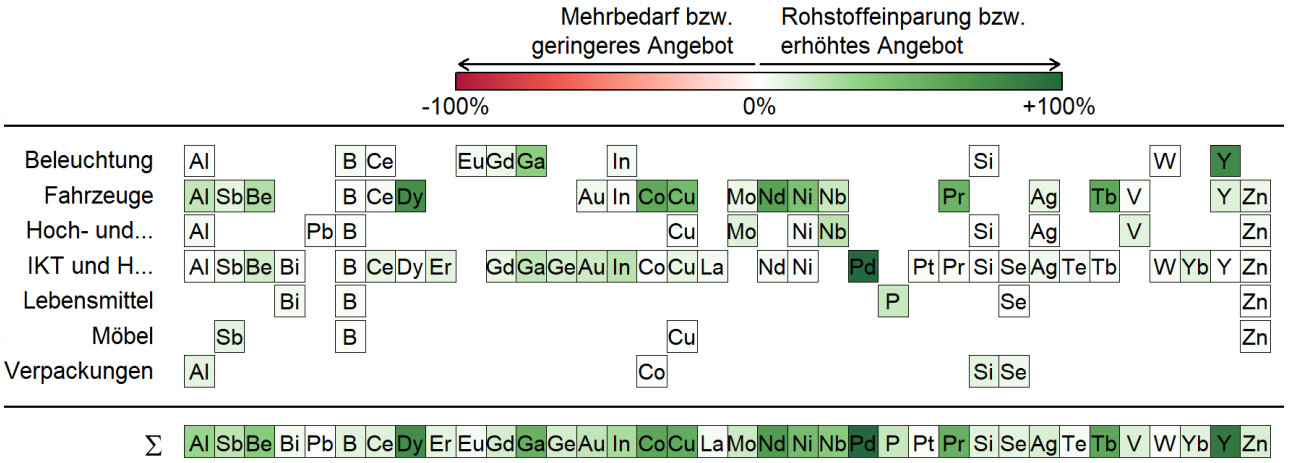
Hinweis: Der Rhodiumbedarf wird durch das Auslaufen der Verbrennungsmotoren auf 0 zurückgehen und wird 2045 für keinen der MDCE-Sektoren mehr relevant sein. Ein Veränderungspotenzial von über +100 % wie für Palladium im Mix-Szenario bedeutet, dass die Menge an Rohstoff, die eingespart werden oder als Sekundärmaterial zur Verfügung gestellt werden kann, den Bedarf übersteigt.

Quelle: Eigene Auswertung.

Betrachtet man ausgehend davon die Veränderungen der **MDCE-Szenarien im Vergleich zur Baseline** zeigt sich, dass die meisten CE-Maßnahmen positive Effekte auf die Versorgungsicherheit Deutschlands haben. Die Umsetzung der vorgestellten CE-Maßnahmen führt zu Einsparungen im Bedarf bzw. zu einem erhöhten (potenziell lokalen) sekundären Angebot an kritischen und umwelt-

relevanten Rohstoffen (Tabelle 3-5). In vielen Fällen kann somit eine Entspannung der Versorgungssicherheit sowie eine Minderung der mit den Rohstoffen verbunden Umweltauswirkungen erreicht werden. Die Effekte sind in Abbildung 4-69 zusammengefasst.

Abbildung 4-69: Gesamtveränderungspotenziale aller Sektoren im Mix-Szenario gegenüber der Baseline.



Hinweis: Bor (B), Silizium (Si) und Phosphor (P) werden nicht elementar, sondern als Borate, Quarzsand und Phosphate betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung.

Es wurden 43 Rohstoffe für die Rohstoffbilanzierung ausgewählt. Die Rohstoffe Holmium, Lutetium, Rhenium, Rhodium, Samarium, Scandium, Thulium werden von keinem der betrachteten Sektoren zu relevanten Anteilen benötigt. Rhodium wird zwar heute noch in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren im Katalysator verwendet, jedoch nicht mehr in 2045 unter der Annahme einer vollständig elektrifizierten PKW-Flotte. Die restlichen 36 der 43 Rohstoffen sind für die Sektoren, die in dieser Studie betrachtet werden, relevant, d.h. es werden nennenswerte Anteile der nach Deutschland importierten Rohstoffe für die Sektoren gebraucht. Über alle Sektoren können insgesamt für 29 von 36 relevanten Rohstoff mindestens +5 % des für 2045 erwarteten Rohstoffbedarfs durch eine Bedarfsreduktion oder ein Mehrangebot durch Recycling gedeckt werden (d.h. Veränderungspotenzial ≥ +5 %).

Die ausgeprägtesten Entspannungen der Versorgungssituation und Umweltentlastung beim Rohstoffabbau sind dabei für Palladium, Yttrium, Dysprosium, Neodym, Terbium, Kobalt, Kupfer, Praseodym und Gallium (9 Rohstoffe) möglich, deren für 2045 in der Baseline angenommener Bedarf zu mehr als +50 % durch die CE-Maßnahmen gedeckt werden kann.

Um die Versorgungslage, die wirtschaftliche Bedeutung und das Umweltgefährdungspotenzial und damit die Relevanz der Ergebnisse für die einzelnen Rohstoffe einzuordnen, kann auf die Einstufung als kritischer Rohstoff gemäß der EU-Kommission (DG DROW 2017a; 2017b) oder auf die Umweltgefährdungspotenzialeinstufung gemäß Dehoust et al. (2020), wie sie in der Machbarkeitsstudie vorgestellt wurde, zurückgegriffen werden. Das Versorgungsrisiko wird auf einer Skala von 0 bis 5 angegeben, ab einem Wert größer oder gleich 1 handelt es sich um ein kritisches Versorgungsrisiko. Wirtschaftlich bedeutend sind Rohstoffe größer oder gleich 2,8 gemäß der Skala der EU-Kommission.

Tabelle 4-15 zeigt, dass es sich bei acht der neun Rohstoffe (Palladium, Yttrium, Dysprosium, Neodym, Terbium, Kobalt, Praseodym und Gallium) mit den ausgeprägtesten Entspannungen der Versorgungslage um von der EU-Kommission als *kritisch* eingestufte Rohstoffe handelt. Die leichten seltenen Erden (Neodym und Praseodym) ist die Rohstoffgruppe, deren Versorgungsrisiko mit dem

Höchstwert 5,0 am bedenklichsten aller bewerteten Rohstoffe eingeschätzt wurde. Auch Palladium, Dysprosium, Terbium, Yttrium, Kobalt und Gallium wurde ein kritisches Versorgungsrisiko zugeordnet. Von den neun Rohstoffen mit dem größten Verbesserungspotenzial durch die CE-Maßnahmen haben alle eine kritische wirtschaftliche Bedeutung. Den als drittgrößtes Basismetall hat Kupfer eine hohe Relevanz in der ganzen Breite der Wirtschaft. Durch eine deutliche Entspannung der Versorgungslage dieser Rohstoffe kann die Circular Economy signifikant dazu beitragen, das Versorgungsrisiko einzuschränken und gleichzeitig die Resilienz der deutschen Wirtschaft im Hinblick auf Rohstoffabhängigkeiten zu stärken.

5 der 9 Rohstoffe mit den größten Veränderungspotenzialen haben ein hohes Umweltgefährdungspotenzial, und zwar Kobalt, Kupfer, Neodym, Praseodym und Palladium. Das Umweltgefährdungspotenzial von Gallium, Dysprosium, Terbium und Yttrium wurde als mittel bis hoch eingeschätzt. Kann die Nachfrage nach den Rohstoffen durch die CE-Maßnahmen reduziert werden, werden folglich die miteinhergehenden Umweltwirkungen gemildert. Im besten Fall geht die Primärproduktion durch einen Bedarfsrückgang ersatzlos zurück. Durch Recycling und eine erhöhte Sekundärproduktion werden die Umweltwirkungen der Primärproduktion gedämpft, und durch in der Regel mildere Umweltwirkungen der Sekundärproduktion ersetzt. Somit kann die Circular Economy auch zu einer umfangreichen Reduktion der Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung und einen Erhalt der natürlichen Ressourcen beitragen.

7 der 43 betrachteten Rohstoffe sind für die im Rahmen dieser Studie betrachteten Sektoren nicht relevant (Holmium, Rhenium, Lutetium, Rhodium, Samarium, Scandium und Thulium). Die Versorgungssicherheit dieser Rohstoffe kann somit durch die hier definierten Maßnahmen nicht verbessert werden. Für weitere 7 Rohstoffe (Tellur, Blei, Platin, Lanthan, Wolfram, Europium und Bismut) können im Mix-Szenario kleine Veränderungspotenziale von bis zu +5 % erreicht werden. Der Grund dafür ist, dass die betrachteten Sektoren relativ kleine Anteile des jeweiligen deutschen Gesamtbedarfs dieser Rohstoffe beziehen. Durch CE-Maßnahmen in über die in dieser Studie hinausgehenden Sektoren (bspw. der Energie- oder umfassender definierte Transportsektor) kann angenommen werden, dass ähnlich signifikante Verbesserungen der Versorgungslage sowie der Umweltwirkungen für diese Rohstoffe erreicht werden können.

Die übrigen 20 der 43 betrachteten Rohstoffe liegen mit einem Veränderungspotenzial zwischen +5 % und +50 % im mittleren Bereich zwischen den gerade beschriebenen extremen Gruppen. Hierbei muss betont werden, dass Bedarfsminderungen oder sekundäres Mehrangebot im Bereich von ≥5 % des Bedarfs eine sehr signifikante Änderung darstellt, sowohl für die Beurteilung der Versorgungssicherheit als auch für das Ausmaß der Umweltwirkungen im Falle einer primären Gewinnung. So beträgt das Verbesserungspotenzial durch die CE-Maßnahmen für Phosphat +17 %, das entspricht knapp 60 kt Phosphat weniger Bedarf oder zusätzliches Recycling in 2045. Für einen derzeit als kritisch und mit hohem Umweltgefährdungspotenzial behafteten Rohstoff, ist dies eine sehr starke Entlastung beider Bewertungsdimensionen.

Aus der Sektorperspektive können die größten Verbesserungen der Versorgungslage im Sektor Fahrzeuge (Veränderungspotenziale von mindestens +5 % bei 15/20 Rohstoffen) erzielt werden. Der Sektor IKT/Haushaltsgeräte ist derjenige, der die meisten Rohstoffe (30) aller Sektoren umfasst. Durch erfolgreich umgesetzte CE-Maßnahmen kann die Versorgungssicherheit einer Vielzahl von Rohstoffen verbessert werden. Für bis zu 12/30 Rohstoffen können Veränderungspotenziale von mindestens +5 % erreicht werden. Die Sektoren Beleuchtung und Lebensmittel sind zwar für weniger Rohstoffe relevant (10 bzw. 5), können jedoch für einzelne Rohstoffe wie Phosphate (VP = +17 %) oder Yttrium (VP = +80 %) die Versorgungslage beträchtlich entspannen.

Tabelle 4-15: Liste der betrachteten Rohstoffe mit Bewertung

Rohstoff	Kritisch	Versorgungs-risiko	Wirtschaftliche Bedeutung	Umweltgefähr-dungspotenzial	Veränderungspotenzial
Palladium	ja	2,5	5	H	+133%
Yttrium	ja	2,4	3,1	M-H	+90%
Dysprosium	ja	2,4	3,1	M-H	+79%
Neodym	ja	5,0	3,6	H	+68%
Terbium	ja	2,4	3,1	M-H	+61%
Kobalt	ja	1,6	5,7	H	+61%
Kupfer	nein	0,2	4,7	H	+58%
Praseodym	ja	5,0	3,6	H	+55%
Gallium	ja	1,4	3,2	M-H	+55%
Nickel	nein	0,3	4,8	H	+48%
Niob	ja	3,1	4,8	M-H	+38%
Beryllium	ja	2,4	3,9	M-H	+38%
Aluminium	nein	0,5	6,5	M-H	+31%
Indium	ja	2,4	3,1	H	+26%
Antimon	ja	4,3	4,3	H	+20%
Gold	nein	0,2	2	H	+19%
Phosphate	ja	1,0	5,1	H	+17%
Molybdän	nein	0,9	5,2	H	+16%
Zink	nein	0,3	4,5	H	+13%
Germanium	ja	1,9	3,5	H	+13%
Gadolinium	ja	2,4	3,1	M-H	+12%
Silber	nein	0,5	3,8	H	+12%
Vanadium	ja	1,6	3,7	H	+11%
Cer	ja	5,0	3,6	H	+11%
Ytterbium	ja	2,4	3,1	M-H	+9%
Borate	ja	3,0	3,1	M-H	+9%
Quarzsand	nein	0,3	2,6	M-H	+9%
Erbium	ja	2,4	3,1	M-H	+8%
Selen	nein	0,4	4,5	H	+8%
Bismut	ja	3,8	3,6	H	+3%
Tellur	nein	0,7	3,4	H	+3%
Europium	ja	2,4	3,1	M-H	+3%
Lanthan	ja	5,0	3,6	H	+3%
Wolfram	ja	1,8	7,3	M-H	+2%
Platin	ja	2,5	5	H	+2%
Blei	nein	0,1	3,7	H	+1%
Holmium	ja	2,4	3,1	M-H	+0%
Rhenium	nein	1,0	2	H	+0%
Lutetium	ja	2,4	3,1	M-H	+0%
Rhodium	ja	2,5	5	H	+0%
Samarium	ja	5,0	3,6	H	+0%
Scandium	ja	2,9	3,7	M-H	+0%
Thulium	ja	2,4	3,1	M-H	+0%

Hinweis: Bewertung der Kritikalität durch die EU: Versorgungsrisiko (kritisch für >1), Wirtschaftlicher Bedeutung (kritisch für >2,8); Umweltgefährdungspotenzial (M-H = mittel bis hoch, H = hoch) sowie Veränderungspotenzial im MDCE-Mix-Szenario
Quelle: Eigene Darstellung nach Dehoust et al. (2020) und DG DROW (2017a; 2017b)

Betrachtet man die Summe der Veränderungspotenziale über alle Sektoren wird deutlich, dass die größten Veränderungen nicht durch einzelne Sektoren oder Maßnahmen, sondern für viele Rohstoffe durch das Zusammenwirken mehrerer Maßnahmen aus mehreren Sektoren erreicht werden können. So werden lediglich vier Rohstoffe nur in einem einzigen Sektor verwendet, alle anderen sind für Sektoren relevant und können daher durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst werden. Zum Beispiel wird das Gesamt-Veränderungspotenzial von Aluminium hauptsächlich vom Fahrzeugsektor bestimmt, setzt sich aber zudem auch aus Beiträgen der Sektoren Bau, IKT- und Haushaltsgeräte und Verpackungen zusammen.

Synthese der Rohstoffbilanzierung auf Sektorebene

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rohstoffbilanzierung (Vergleich der Szenarien mit dem Baseline-Szenario) auf Sektorebene kurz zusammengefasst:

Für die Rohstoffbilanzierung sind im **Bausektor** vor allem die für die Stahlproduktion relevanten Rohstoffe, sowie Quarzsand als Glasbasis von Belang. Das rückläufige Wachstum des Bausektors im Baseline-Szenario wirkt sich bereits im Baseline-Szenario positiv auf die Versorgungssicherheit von Niob und Quarzsand (VP = +8 % und +7 %). Im ambitioniertesten Szenario (Mix-Szenario) können für die drei Stahlzusätze Niob, Molybdän und Vanadium durch die CE-Maßnahmen +9 bis +21 % des Bedarfs durch Einsparungen oder Mehrbedarf abgedeckt werden. Die einflussreichsten Maßnahmen sind dabei die Reduktion der Wohn- und Bürorauminanspruchnahme (Maßnahme 1), und die Reduktion des Einsatzes von Baustahl und Strukturbeton durch Design (Maßnahme 7). Das Technologie- und Verhalten-Szenario leisten einen ähnlich großen Beitrag zur Entspannung der Versorgungssituation.

Der technologische Wandel von Verbrennungsmotoren zu batteriebetriebenen Elektromotoren wird die Rohstoffbedarfe im **Fahrzeugsektor** absehbar bereits im Baseline-Szenario drastisch verändern. Es ist davon auszugehen, dass sich der Bedarf an Rohstoffen für Batterie- (Kobalt, Nickel, Kupfer) und Magnetproduktion (die seltenen Erden Dysprosium, Neodym, Terbium und Praseodym) bis 2045 vervielfachen wird. Beispielsweise verzwanzigfacht sich der Dysprosiumbedarf des Fahrzeugsektors im Baseline-Szenario 2045 mit etwa 17 t pro Jahr im Vergleich zum Status quo (etwa 0,9 t).

Im ambitioniertesten Mix-Szenario kann die Versorgungslage von 15 der 20 Rohstoffe deutlich verbessert werden (Veränderungspotenziale ≥ +5 %). Die stärksten Verbesserungen mit Veränderungspotenzialen von über +50 % ergeben sich für die E-PKW spezifischen Rohstoffe Dysprosium, Neodym, Terbium, Kobalt und Praseodym. Die einflussreichsten Maßnahmen für die Versorgungssicherheit (d.h. die mit dem größten Veränderungspotenzial) sind die verhaltensgetriebenen Maßnahmen zum Ersetzen des Individualverkehrs (Maßnahmen 1a-c), sowie die im Technologie- und Mix-Szenario am stärksten ausgeprägte Maßnahmen zur Verlängerung der PKW-Nutzungsdauer (Maßnahme 2b). Das Verhalten-Szenario kann mit Veränderungspotenzialen von über +5 % für 14 Rohstoffe dabei mehr zur Versorgungssicherheit beitragen als das Technologie-Szenario (7 Rohstoffe mit Veränderungspotenzialen von mindestens +5 %).

Der Fahrzeugsektor ist in Hinblick auf die Versorgungssicherheit der einflussreichste der in dieser Studie betrachteten Sektoren. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Rohstoffe, die als weniger kritisch eingeschätzt werden können, als auch das mittlere Veränderungspotenzial.

Der **Sektor „IKT- und Haushaltsgeräte“** ist in der Produkt- und Technologiezusammensetzung breit gefächert. Dementsprechend wird für die Produktion in Deutschland eine Vielzahl an Techno-

logiemetallen benötigt, darunter unter anderem seltene Erden, Platingruppenmetalle und Edelmetalle. Die zukünftige Entwicklung des Rohstoffbedarfs und -angebots dieses Sektors wird daher die Versorgungssicherheit vieler verschiedenen Rohstoffe und Elementgruppen beeinflussen. Eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft kann die Versorgungslage in diesem Bereich besonders umfassend entlasten.

Die Bedarfsentwicklung im Baseline-Szenario ist durch den erwarteten Ausbau von Rechenzentren geprägt. Deutliche Veränderungen zeigt dieser Trend bei Gallium (VP = –8 %, das entspricht einem Mehrbedarf von 8 %).

Die einflussreichste CE-Maßnahmen für die Versorgungssicherheit (d.h. die mit dem größten Veränderungspotenzial) ist Maßnahme 1 zur Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer. Deutliche Verbesserungen der Versorgungslage können für 9 Rohstoffe erzielt werden. Besonders ausgeprägt sind die Effekte für Indium, Gallium, Beryllium und Germanium (VP > +10 %). Vielversprechend ist zudem eine erhöhte Rückgewinnung von Rohstoffen aus Endgeräten (Maßnahme 3), insbesondere im Recycling von Geräten der IKT. Die Produkte werden zwar größtenteils im Ausland gefertigt und importiert, können jedoch am Ende der Nutzungsdauer vor Ort recycelt und enthaltene Rohstoffe als Sekundärmaterial wiedergewonnen werden. Auch wenn die Mengen pro Gerät gering erscheinen mögen (z.B. etwa 0,03 g Gold pro Smartphone nach Rizos et al. 2019, vgl. Bookhagen et al. 2020), können durch die hohen Bestände der annähernd gesättigten deutschen Märkte im Mix-Szenario Veränderungspotenziale von +171 % für Palladium und +25 % für Gold erreicht werden. Dabei ist das ambitionierteste Mix-Szenario den Ausprägungen in Verhalten- und Technologie-Szenario deutlich überlegen (+83 % bzw. +64 % für Palladium).

Insgesamt können die CE-Maßnahmen im Mix-Szenario für 12 der 30 betrachteten Rohstoffe eine deutliche Verbesserung der Versorgungslage erzielen.

Im **Sektor „Ernährung“** finden mineralische Rohstoffe vor allem als Düngemittel (Phosphate, Borate, Zink), Futtermittel (Phosphate, Bismut, Selen), oder Nahrungszusätze (Selen, Zink) Anwendung. Das nach Deutschland importierte Phosphat wird zu 93 % für die Landwirtschaft bzw. Lebensmittelproduktion verwendet, daher ist der Lebensmittelsektor für diesen Rohstoff ausschlaggebend. Bereits in der Baseline zeichnet sich ein deutlicher Rückgang des Phosphatbedarfs von +10 % gegenüber dem Status quo ab. Zusätzliche CE-Maßnahmen können den Phosphatbedarf weiter reduzieren. Am einflussreichsten ist dabei eine Ernährungsumstellung hin zu einer vorwiegend pflanzenbasierten Ernährung (Maßnahme 1, VP = +7 %), gefolgt von einer Reduktion der Lebensmittelabfälle (Maßnahme 3, VP = +6 %).

Im **Möbelsektor** wurden die vier Rohstoffe Antimon, Borate, Kupfer und Zink betrachtet. Nur für das von der Europäischen Kommission als kritisch eingestufte Antimon stellen Möbel mit einem Sektoranteil von etwa 11 % eine wichtige Endnutzung dar. Antimon dient dabei vor allem in Polstermöbeln als Flammschutz. Im Verhalten- und Mix-Szenario kann für Antimon ein Veränderungspotenzial von +8 % erreicht werden. Der überwiegende Anteil daran fällt mit +7 % auf das Ökodesign für langlebige Möbel zurück. Das Technologie-Szenario ermöglicht keine signifikante Verbesserung der Versorgungslage.

Betrachtet man die Rohstoffbilanzen, kann die Etablierung einer Circular Economy im **Beleuchtungssektor** für die seltenen Erden Yttrium, Europium und Gadolinium sowie das Technologiemetall Gallium eine entscheidende Rolle in der zukünftigen Versorgungssicherheit einnehmen. Ein technologischer Wandel hin zu einer überwiegenden Nutzung von längerlebigen LEDs und Gasentladungslampen wird bereits im Baseline-Szenario zu veränderten Rohstoffbedarfen und einer rückläufigen Lampenproduktion führen. Dabei können Veränderungspotenziale von bis zu +23 % für Europium

erreicht werden. Werden zusätzlich die CE-Maßnahmen erfolgreich umgesetzt, kann auch die Versorgungssituation von Yttrium, Gallium und Gadolinium eine deutliche Entspannung erfahren. Verhaltens- und technikgetriebene Maßnahmen können einen ähnlich großen Beitrag zu den Gesamtveränderungspotenzialen des Mix-Szenarios von +80 %, +36 % und +6 % für Yttrium, Gallium und Gadolinium leisten.

Im Hinblick auf die Rohstoffbilanzierung sind im **Verpackungssektor** vor allem Glas und Aluminium als Materialien von Bedeutung, außerdem spielen Selen (als Färbungs- oder Entfärbungsmittel) und Kobalt (zur Blaufärbung von Glasbehältern für Schutz des Inhalts vor UV-Strahlung) eine Rolle. Während im Baseline-Szenario keine signifikante Änderung zum Status quo erwartet wird, können erfolgreich umgesetzte CE-Maßnahmen bis zu +8 % des für 2045 erwarteten Aluminium- und Quarzsandbedarfs durch Einsparungen oder zusätzliches Recycling abdecken. Auch für Selen kann eine deutliche Entspannung der Versorgungssituation mit einem Veränderungspotenzial von +5 % erreicht werden. Dabei wird die Veränderung nicht vornehmlich durch eine Einzelmaßnahme, sondern das Zusammenwirken aller drei Maßnahmen erreicht.

Der **Textilsektor** ist für keinen der 43 in dieser Studie betrachteten Rohstoffe ein mengenanteilsmäßig relevanter Anwendungsbereich.

4.2.2 Rohstoffbilanzierung auf Sektorebene

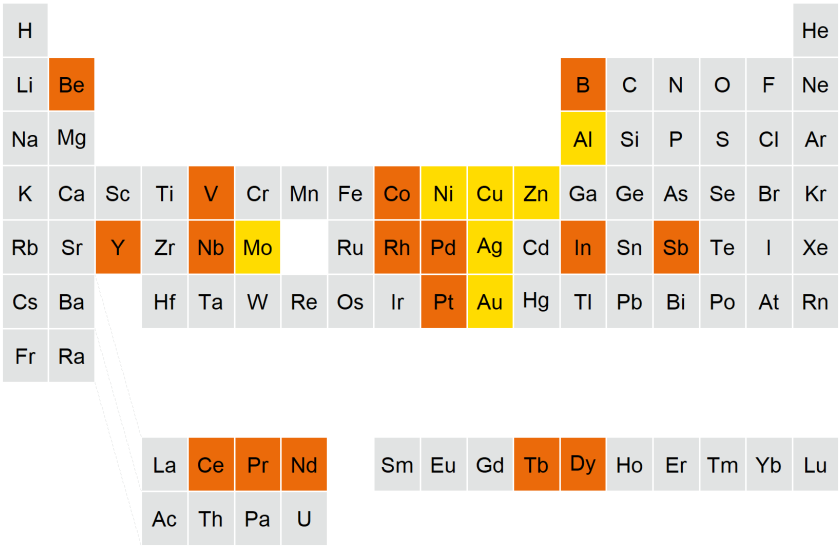
4.2.2.1 Fahrzeuge und Batterien

Durch die Verschmelzung von Mechanik und Elektronik in Fahrzeugen und eine weiter zunehmende Technologisierung des Transportsektors werden für die Produktion von Fahrzeugen eine Vielzahl von Rohstoffen benötigt. Zwanzig der 43 in dieser Studie betrachteten Rohstoffe (vgl. Abbildung 4-70) sind für den Fahrzeugsektor und insbesondere für die E-Mobilität relevant. Dazu gehören

- die seltenen Erden Dysprosium, Neodym, Yttrium, Terbium, Praseodym und Cer;
- die Edelmetalle Gold und Silber;
- weitere Technologiemetalle wie Beryllium, Niob, Antimon, Molybdän, Kobalt, Indium und Vanadium; und
- die Basismetalle und Massenrohstoffe Aluminium, Kupfer, Nickel, Zink und Borate.

Im Jahr 2020 wurden 13 dieser 20 Rohstoffe von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft, nämlich Dysprosium, Neodym, Yttrium, Terbium, Praseodym, Cer, Beryllium, Niob, Antimon, Kobalt, Indium, Vanadium und Borate. Weitere sieben Rohstoffe mit Umweltgefährdungspotenzial spielen im Fahrzeugsektor eine Rolle.

Abbildung 4-70: Für den Fahrzeugsektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Bor (B) wird nicht elementar, sondern als Borate betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c). Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.

Quelle Eigene Darstellung

Der bereits eingeleitete technologische Wandel von Verbrennungsmotoren zur E-Mobilität wird die Rohstoffbedarfe des Fahrzeugsektors umwälzen. Bedarfe von Rohstoffen zur Batterie- (Kobalt, Nickel, Kupfer) und Magnetproduktion (Dysprosium, Neodym, Terbium und Praseodym) werden sich bis 2045 voraussichtlich vervielfachen. Die Baseline-Veränderungspotenziale des deutschen Gesamtbedarfs belaufen sich allein durch den Fahrzeugsektor auf -100 % für Kupfer (dies entspricht einer Verdopplung) bis -600 % für Dysprosium (dies entspricht einer Versiebenfachung). Die Bereitstellung und ein möglichst umwelt- und sozialverträglicher Abbau der Rohstoffe für diese Transformation werden voraussichtlich eine der großen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte darstellen.

Die Versorgungssituation einiger Platingruppenmetalle (Palladium, Platin, Rhodium) sowie der seltenen Erde Cer wird sich durch eine rückläufige Produktion von Verbrennungsmotoren entspannen. Große Anteile von 35 % bis 87 % dieser Rohstoffe flossen bisher in die Herstellung von Autokatalysatoren, die für E-PKWs nicht benötigt werden.

Tabelle 4-16 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Szenarien. Auffällig ist die bereits erwähnte drastische Bedarfszunahme von batterie- und magnetspezifischen Rohstoffen im Baseline-Szenario. Im Verhalten-Szenario kann die Versorgungslage von insgesamt 14 der 20 relevanten Rohstoffe mit einem Veränderungspotenzial von mindestens +5 % deutlich verbessert werden. Insbesondere für Dysprosium, Neodym, Kobalt, Terbium, Praseodym, Kupfer und Nickel können große Veränderungspotenziale von +36 % bis +59 % ggü. der Baseline erzielt werden. Weniger ausgeprägt, aber dennoch erhebliche Verbesserungen können im Technologie-Szenario erzielt werden, in dem 7 der 20 Rohstoffe Veränderungspotenziale von über +5 % aufweisen.

Die weitreichendsten Verbesserungen können im ambitioniertesten Mix-Szenario erreicht werden. Für insgesamt 15 der 20 relevanten Rohstoffe beläuft sich das Veränderungspotenzial auf über +5 %, davon erreichen 7 sogar Werte über +40 %. Die stärkste Verbesserung ist für Dysprosium (VP = +77 %) zu erwarten.

Tabelle 4-16: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Fahrzeugsektor

	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*3 / 20*	14 / 20	7 / 20	15 / 20
Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	***Beryllium (+8 %)*** *Aluminium (+7 %)* ***Niob (+5 %)***	**Dysprosium (+59 %)** **Neodym (+50 %)** **Kobalt (+48 %)** **Terbium (+46 %)** **Praseodym (+41 %)** Kupfer (+39 %) **Nickel (+36 %)** **Beryllium (+19 %)** Aluminium (+16 %) **Niob (+13 %)** **Yttrium (+8 %)** **Antimon (+6 %)** Silber (+5 %) Zink (+5 %)	**Dysprosium (+12 %)** **Neodym (+10 %)** **Terbium (+9 %)** **Kobalt (+8 %)** **Praseodym (+8 %)** Kupfer (+7 %) **Nickel (+6 %)**	**Dysprosium (+77 %)** **Neodym (+64 %)** **Terbium (+60 %)** **Kobalt (+59 %)** **Praseodym (+53 %)** Kupfer (+49 %) **Nickel (+44 %)** **Beryllium (+24 %)** Aluminium (+19 %) **Niob (+17 %)** **Yttrium (+10 %)** **Antimon (+8 %)** Silber (+7 %) Zink (+6 %) **Molybdän (+6 %)**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	*7 / 20*	0 / 20	0 / 20	0 / 20
Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	***Dysprosium (-600 %)*** ***Neodym (-255 %)*** ***Terbium (-200 %)*** ***Praseodym (-145 %)*** ***Kobalt (-113 %)*** *Kupfer (-105 %)* ***Nickel (-64 %)***	n/v	n/v	n/v

Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).

Quelle: Eigene Darstellung

Innerhalb des Mix-Szenarios tragen die drei Maßnahmenbündel unterschiedlich stark zu der möglichen Entspannung der Versorgungssicherheit bei. Die Reduktion des Individualverkehrs (Maßnahme 1a-c) zielt auf einen Rückgang der PKW-Neuproduktionen ab. Daher wirkt sich diese Maßnahme auf alle für den Sektor relevanten Rohstoffe aus. Wenn im Mix-Szenario diese Maßnahme erfolgreich umgesetzt wird, kann die Versorgungssicherheit von 13 der 20 relevanten Rohstoffe deutlich verbessert werden (VP ≥ +5 %). Besonders starke Veränderungen können für Dysprosium (+53 %), Neodym (+44 %) und Terbium (+41 %) erreicht werden.

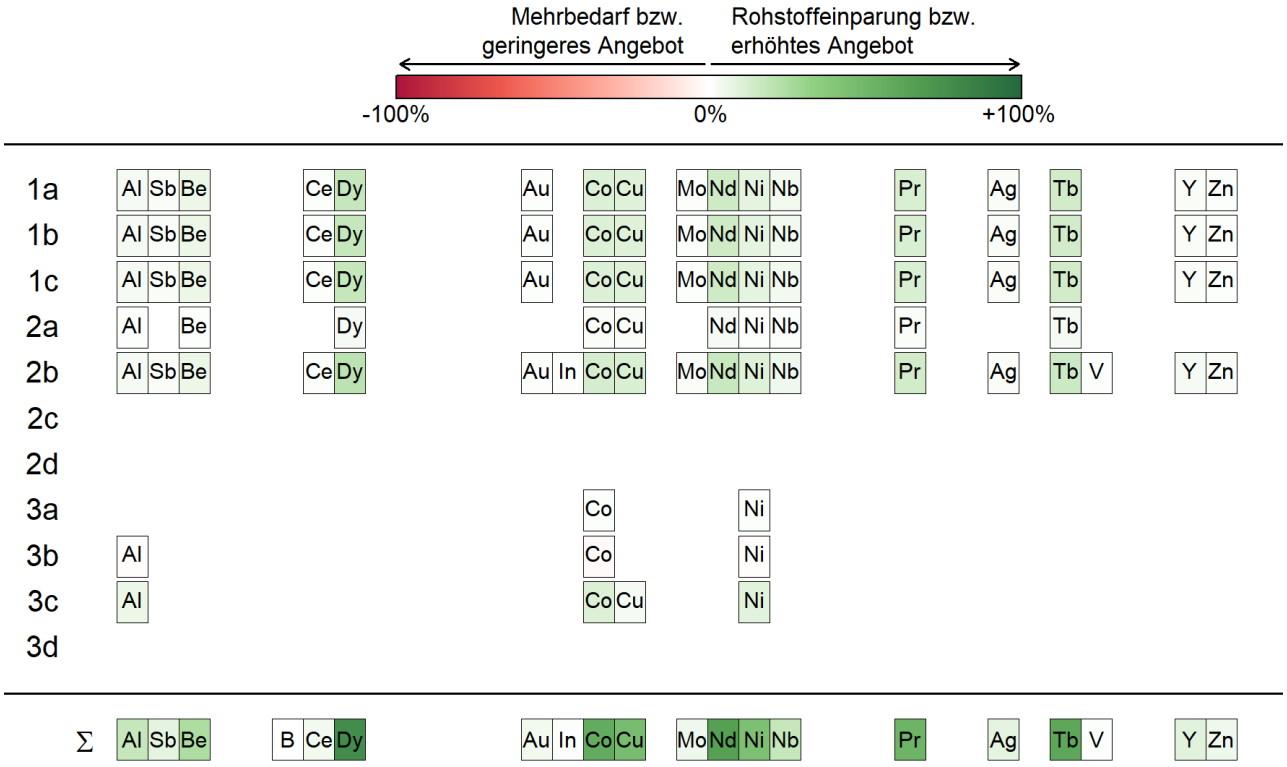
Innerhalb des Maßnahmenbündels 2a-d erzielt eine Verlängerung der PKW-Nutzungsdauer (Maßnahme 2b) den stärksten Effekt auf die Versorgungssicherheit. Ähnlich wie die Reduktion des Individualverkehrs durch ÖPV, Car-Sharing und Ride-Pooling (Maßnahme 1a-c) betrifft der erwartete

Rückgang von Neuzulassungen als Folge der Lebensdauerverlängerung alle Rohstoffe des Sektors. 9 der 20 Fahrzeug-relevanten Rohstoffe erreichten ein Veränderungspotenzial von mindestens +5 %, 7 der 20 von mehr als +10 %. Die weiteren Maßnahmen des Bündels können zur Verbesserung der Rohstoffversorgungssicherheit nicht wesentlich beitragen. Die Reduktion der Fahrzeuggröße (Maßnahme 2a) erzielt Veränderungspotenziale bis zu maximal +3 % für Dysprosium. Die Veränderungspotenziale durch vermehrte Wiederverwendung von PKW-Komponenten (Maßnahme 2d) liegen für alle Rohstoffe unter +1 %. Eine Erhöhung der End of Life-Recylingrate von PKWs (Maßnahme 2c) wurde von den Sektorexpert*innen als geringfügig einflussreich angesehen und nicht quantifiziert.

Die Maßnahmen 3a-d sind batteriespezifisch und beeinflussen dementsprechend Kobalt, Nickel, Aluminium und Kupfer – Metalle, die zur Batterieherstellung verwendet werden. Innerhalb des Bündels dominiert die Reduktion der Batteriekapazität (Maßnahme 3c) im Hinblick auf die Rohstoffbedarfe. Deutliche Verbesserungen der Versorgungslage können für Aluminium (VP = +6 %), Cobalt (VP = +12 %) und Nickel (VP = +9 %) erzielt werden. Die Effekte durch langlebiges Design der Fahrzeugbatterie (Maßnahme 3a) sowie eine erhöhte End of Life-Recylingrate der Batterie (Maßnahme 3b) wirken sich nur geringfügig auf die Versorgung des deutschen Marktes mit Batteriemetallen aus. Die Maßnahme 3d (Repurpose von End of Life-Batterien) wurde nicht quantifiziert, da die End of Life-Batterien zumeist als stationäre Energiespeicher weitergenutzt und somit den in dieser Studie betrachteten Sektoren entzogen werden.

Abbildung 4-71 zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1a-3d zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-71: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Fahrzeugsektor (Mix-Szenario)



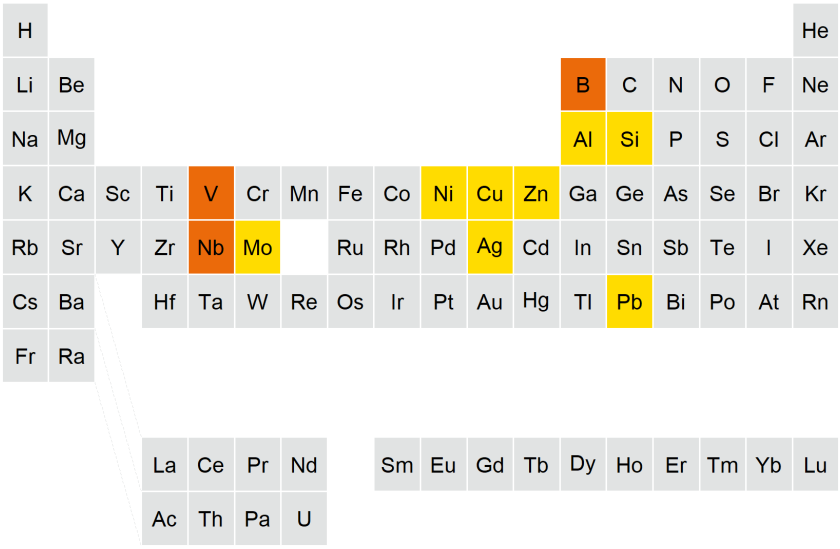
Hinweis: Bor (B) wird nicht elementar, sondern als Borate bezeichnet.
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2.2 Hoch- und Tiefbau

Aufgrund der Datenlage wurden Hoch- und Tiefbau bei der Betrachtung der Rohstoffversorgungssicherheit als Bausektor gemeinsam betrachtet. Die Maßnahmennummerierung wurde vom Hochbausektor übernommen (vgl. Kapitel 4.1.2.2).

Während Zement als Baustoff keine kritischen Rohstoffe oder solche mit hoher Umweltwirkung beinhaltet, ist Baustahl aufgrund der mineralischen Stahlzusätze wie Niob, Molybdän, Vanadium und Nickel sowie Zink zum Korrosionsschutz für die Betrachtung von Veränderungen in der Versorgungssicherheit relevant. Zudem wurden Rohstoffe für die Glasproduktion (Quarzsand, Borat und Silber), sowie Aluminium, Kupfer und Blei betrachtet. Drei dieser elf Rohstoffe (Niob, Vanadium und Borate) wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (orange in Abbildung 4-72), die anderen weisen ein hohes Umweltgefährdungspotenzial gemäß Dehoust et al. (2020) auf (gelb in Abbildung 4-72).

Abbildung 4-72: Für den Bausektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Bor (B) und Silizium (Si) werden nicht elementar, sondern als Borate bzw. Quarzsand betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c).. Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-17: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Bausektor

	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 % Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*2 / 11* ***Niob (+8 %)*** *Quarzsand (+7 %)*	2 / 11 **Niob (+10 %)** Molybdän (+5 %)	3 / 11 **Niob (+14 %)** Molybdän (+7 %) **Vanadium (+6 %)**	3 / 11 **Niob (+21 %)** Molybdän (+10 %) **Vanadium (+9 %)**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ -5 % Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ -5 %	*0 / 11* *n/v*	0 / 11 n/v	1 / 11 Quarzsand (-8 %)	0 / 11 n/v

Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-17 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse für die Szenarien. Bereits im Baseline-Szenario wird ein Rückgang von Hoch- und Tiefbau erwartet, und damit ein Rückgang des Bedarfs an Baurohstoffen bis 2045. Die Veränderungspotenziale liegen dabei für alle elf betrachteten Rohstoffe zwischen +1 und +8 %.

Verhaltens- und technikgetriebene Umsetzungen der CE-Maßnahmen können zur Entspannung der Versorgungslage in ähnlichem Umfang beitragen. Die ausgeprägteste Entspannung der Rohstoffversorgunglage wird durch das ambitionierteste Szenario (Mix-Szenario) erreicht.

Im Mix-Szenario sind die Maßnahmen mit dem größten Potenzial im Hinblick auf die Versorgungssicherheit eine Reduktion der Wohn- und Bürorauminanspruchnahme (Maßnahme 1), sowie die Reduktion des Einsatzes von Baustahl und Strukturbeton durch Design (Maßnahme 7). Beide Maßnahmen zielen auf eine Bedarfsreduktion ab, sodass weniger Materialien für Neubau benötigt werden. Die Reduktion der Rauminanspruchnahme (Maßnahme 1) betrifft dabei alle Rohstoffe des Bausektors und erreicht Veränderungspotenziale von über +5 % für Niob und Quarzsand. Die Reduktion von Baustahl und Strukturbeton (Maßnahme 7) wirkt sich nur auf die fünf Stahl-spezifischen Rohstoffe aus. Für Niob, Molybdän und Vanadium können Veränderungspotenziale von +5 % bis +11 % erzielt werden.

Eine Lebensdauerverlängerung von Gebäuden (Maßnahme 3) kann zudem leicht zur Entspannung der Versorgungssituation beitragen. Das betrifft in erster Linie die Rohstoffe, die in der Bausubstanz Anwendung finden, also die Legierungselemente (Niob, Molybdän, Vanadium, Nickel) und Zink. Demgegenüber stehen z.B. Glas-basierte Komponenten wie Fenster, die bei Renovierungen und Sanierungen häufig nicht erhalten werden und deren Rohstoffbedarfe daher von der Maßnahme nicht beeinflusst werden. Für die Stahl-spezifischen Rohstoffe werden Veränderungspotenziale von +1 % bis +4 % erreicht.

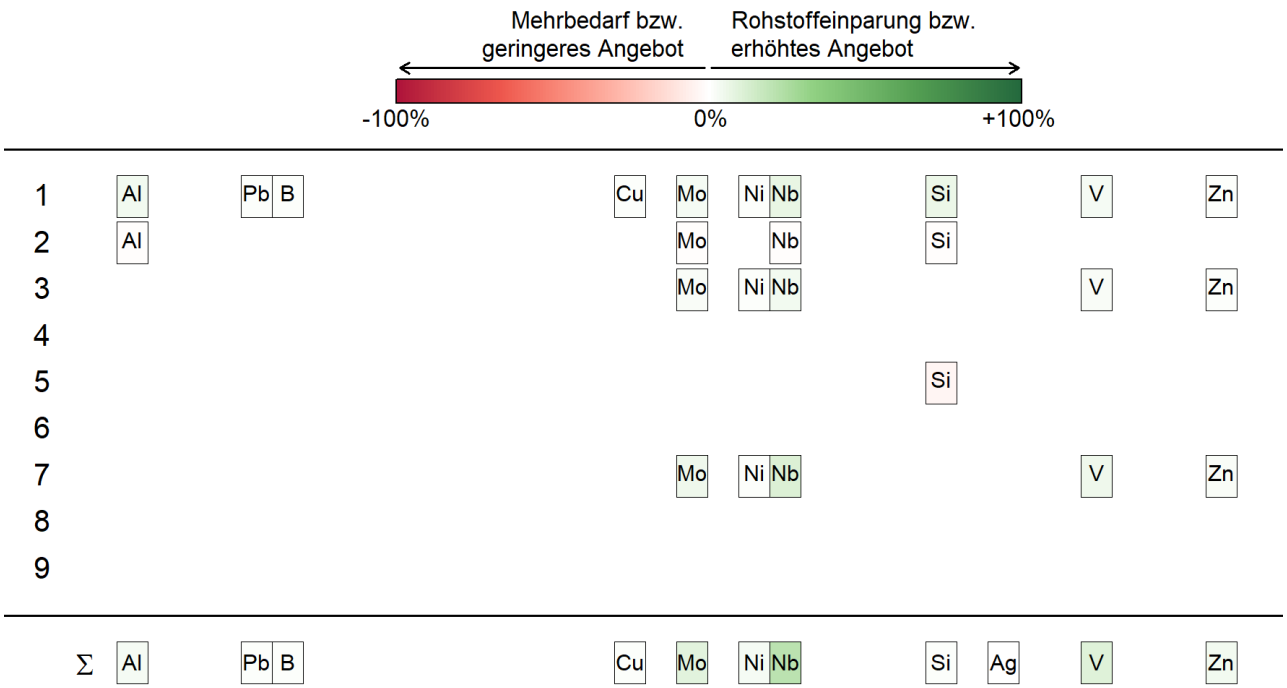
Werden in der Maßnahme „Verwendung alternativer Bindemittel in der Zementherstellung“ (Maßnahme 5) Calciumhydrosilicate (CHS) eingesetzt (VDZ 2020), muss man mit einem Anstieg des Quarzsandbedarfs rechnen (VP = -4 %).

Die Wiederverwendung von Bauteilen (Maßnahme 2) und Baustahl (Maßnahme 8) sowie die Nutzung nachwachsender Materialsubstitute (Maßnahme 6) haben nach unseren Berechnungen keinen signifikanten Einfluss auf die Rohstoffversorgungssicherheit (VP < +1 %).

Die Maßnahmen 4 (Reduktion des Klinkerfaktors) und 9 (Zementrecycling) wurden nicht quantifiziert, da sie keinen der ausgewählten Rohstoffe betreffen (vgl. Abbildung 4-73).

Abbildung 4-73 zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1-9 zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-73: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Bausektor (Mix-Szenario)



Hinweis: Bor (B) und Silizium (Si) werden nicht elementar, sondern als Borate bzw. Quarzsand betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung

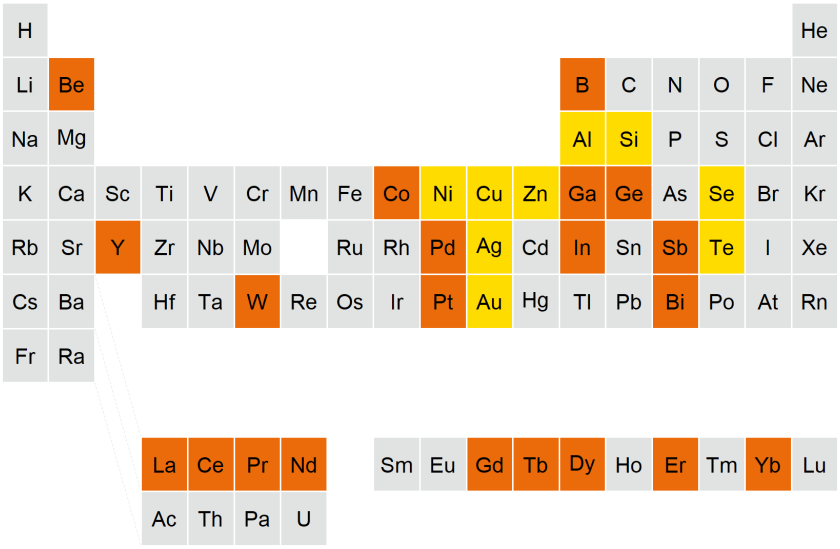
4.2.2.3 IKT und Haushaltsgeräte

Der Sektor IKT und Haushaltsgeräte umfasst eine Vielzahl von Produkten und Technologien, für die 30 der 43 betrachteten Rohstoffe relevant sind. Anwendung finden

- seltene Erden wie Dysprosium, Ytterbium, Neodym, Erbium, Gadolinium, Cer, Praseodym, Terbium, Lanthan und Yttrium;
- Edelmetalle wie Gold, Platin, Palladium und Silber;
- weitere Technologiemetalle wie Indium, Gallium, Beryllium, Germanium, Antimon, Kobalt, Wolfram, Tellur, Selen und Bismut; und
- Basismetalle und Massenrohstoffe wie Aluminium, Kupfer, Nickel, Zink, Borate und Quarzsand.

Von diesen 30 wurden 21 von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft, nämlich Indium, Gallium, Beryllium, Germanium, Dysprosium, Ytterbium, Neodym, Erbium, Gadolinium, Cer, Praseodym, Antimon, Terbium, Lanthan, Kobalt, Borate, Bismut, Palladium, Platin, Yttrium und Wolfram. Die anderen neun Rohstoffe wurden (zusätzlich) mit hohem bzw. mittlerem bis hohem Umweltgefährdungspotenzial gemäß Dehoust et al. (2020) eingestuft.

Abbildung 4-74: Für den Sektor IKT und Haushaltsgeräte relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Bor (B) und Silizium (Si) werden nicht elementar, sondern als Borate bzw. Quarzsand betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c). Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-18 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Szenarien: Im Verhalten-Szenario kann die Versorgungslage von insgesamt 10 der 30 relevanten Rohstoffe mit einem Veränderungspotenzial von mindestens +5 % deutlich verbessert werden. Im Technologie-Szenario ist dies für 6 der 30 Rohstoffe möglich. Die stärksten Verbesserungen können im ambitioniertesten Mix-Szenario erreicht werden, in dem für 12 der 30 Rohstoffe ein Veränderungspotenzial von mindestens +5 % erzielt werden kann.

Innerhalb des Mix-Szenarios ist die vielversprechendste Maßnahme zur Entspannung der Versorgungssituation eine Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer von Geräten (Maßnahme 1). Wenn Geräte länger genutzt und seltener ersetzt werden, kann der Bedarf aller für den Sektor relevanten Rohstoffe reduziert werden. Fließen große Anteile des Gesamtbedarfs in diesen Sektor, kann diese Bedarfsreduktion die Versorgungssicherheit der deutschen Wirtschaft deutlich entspannen. Für 9 Rohstoffe können Veränderungspotenziale von mindestens +5 % erreicht werden. Dabei handelt es sich mehrheitlich um Technologiemetalle, die von der EU 2020 als kritisch eingestuft wurden (Indium, Gallium, Beryllium und Germanium sowie die seltenen Erden Dysprosium, Ytterbium, Erbium, Gadolinium und Cer) und Kupfer. Für Indium, Gallium, Beryllium und Gallium liegen die Veränderungspotenziale dabei zwischen +13 % und +21 %. Da durch die längere Nutzungsdauer der Geräte weniger Altgeräte recycelt werden, steht weniger Schrott zur Verfügung und es können folglich weniger Rohstoffe zurückgewonnen werden. Dies zeigt sich bei Gold und Palladium deutlich, mit Veränderungspotenzialen von –10 % bzw. -36 %.

Tabelle 4-18: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Sektor IKT und Haushaltsgeräte

	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*3 / 30*	10 / 30	6 / 30	12 / 30
Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*Gold (+27 %)* ***Palladium (+9 %)*** ***Wolfram (+6 %)***	**Palladium (+27 %)** **Indium (+21 %)** **Gallium (+19 %)** **Beryllium (+14 %)** **Germanium (+13 %)** **Ytterbium (+9 %)** **Erbium (+8 %)** **Gadolinium (+7 %)** **Cer (+7 %)** Kupfer (+6 %)	**Palladium (+63 %)** **Indium (+10 %)** **Gallium (+10 %)** **Beryllium (+7 %)** Gold (+7 %) **Germanium (+6 %)**	**Palladium (+133 %)** **Indium (+21 %)** **Gallium (+19 %)** **Beryllium (+14 %)** **Germanium (+13 %)** Gold (+15 %) **Ytterbium (+9 %)** **Erbium (+8 %)** Kupfer (+7 %) **Gadolinium (+7 %)** **Cer (+7 %)** Silber (+5 %)
Anzahl Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	*1 / 30*	0 / 30	0 / 30	0 / 30
Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	***Gallium (-9 %)***	n/v	n/v	n/v

Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).
Quelle: Eigene Darstellung

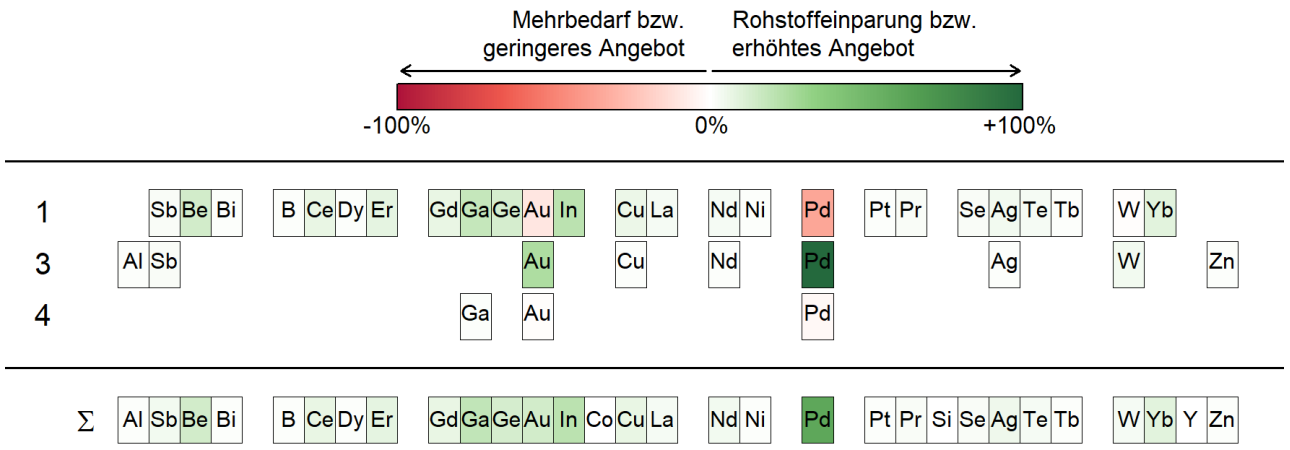
Eine verbesserte Sammlung und erhöhte Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten (Maßnahme 3) umfasst weitaus weniger Rohstoffe, kann jedoch die Versorgung der Wirtschaft mit den Edelmetallen Palladium (VP = +171 %[32]) und Gold (VP = +25 %) deutlich erleichtern. Das Veränderungspotenzial von Palladium ist damit das größte dieser Studie. Dies folgt zum einen daraus, dass Edelmetalle wie Palladium und Gold aufgrund ihrer Korrosionsbeständigkeit bei angemessener Behandlung (vgl. Chancerel et al. 2009) mit relativ geringen Verlusten aus den Geräten zurückgewonnen werden können. Zum anderen ist zu erwarten, dass der Palladiumbedarf bis 2045 auch ohne zusätzliche CE-Maßnahmen (d.h. im Baseline-Szenario) deutlich sinken wird. 2020 wurden 87 % des importierten Palladiums zur Herstellung von Autokatalysatoren genutzt. Mit dem Auslaufen von Verbrennungsmotoren durch den Umstieg zur Elektromobilität wird dieser Anwendungsbereich von Palladium obsolet werden. Es ist also zu erwarten, dass der IKT- und Haushaltsgerätesektor zukünftig eine entscheidende Rolle im Palladium-Recycling innehaben wird.

Eine ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren (Maßnahme 4) kann nach unseren Berechnungen die Versorgungslage der betroffenen Rohstoffe in dem Betrachtungszeitraum nur marginal verbessern. Das größte Veränderungspotenzial wird dabei für Gallium mit +1 % erreicht. Der Einfluss von Remanufacturing (Maßnahme 2) wurde von den Sektorexpert*innen als geringfügig angesehen und daher nicht quantifiziert.

[32] Ein Veränderungspotenzial von über +100 % bedeutet, dass mehr Rohstoff eingespart oder als Sekundärmaterial zur Verfügung gestellt werden kann, als 2045 gebraucht werden wird. Dies ist ein kurzfristiger Effekt, der nur besteht, bis sich die Schrottmenge dem reduzierten Konsum angleicht.

Abbildung 4-75 zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1-4 zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-75: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Sektor IKT und Haushaltsgeräte (Mix-Szenario)

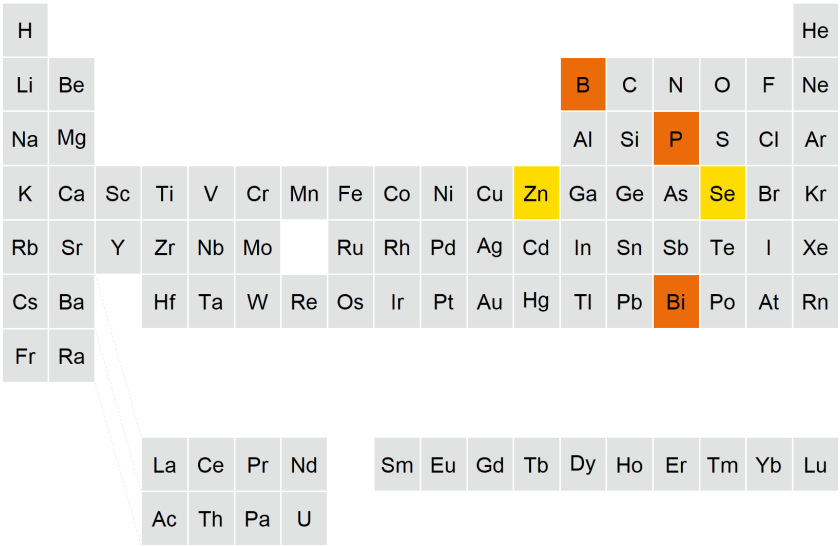


Hinweis: Bor (B) und Silizium (Si) werden nicht elementar, sondern als Borate bzw. Quarzsand betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2.4 Lebensmittel und Ernährung

Im Sektor Ernährung finden mineralische Rohstoffe vor allem als Düngemittel (Phosphate, Borate, Zink), Futtermittel (Phosphate, Bismut, Selen), oder Nahrungszusätze (Selen, Zink) Anwendung (siehe Abbildung 4-76). Borate, Phosphate und Bismut wurden 2020 von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft. Das nach Deutschland importierte Phosphat wird zu 93 % für die Landwirtschaft bzw. Lebensmittelproduktion verwendet. Der Ernährungssektor ist daher vor allem für den deutschen Phosphatbedarf ausschlaggebend. Zink und Selent wurden (zusätzlich) mit hohem bzw. mittlerem bis hohem Umweltgefährdungspotenzial gemäß Dehoust et al. (2020) eingestuft.

Abbildung 4-76: Für den Ernährungssektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Bor (B) und Phosphor (P) werden nicht elementar, sondern als Borate bzw. Phosphate betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c). Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-19 gibt einen Überblick über die wichtigsten Veränderungspotenziale (≥ +5 %) der Szenarien. Bereits im Baseline-Szenario, also ohne zusätzlich umgesetzte CE-Maßnahmen, wird eine zunehmend pflanzenbasierte Ernährung erwartet. Dadurch kann ein Phosphat-Veränderungspotenzial von +10 % gegenüber dem Status quo erzielt werden. Ernährt sich ein größerer Anteil der Bevölkerung fleischreduziert, vegetarisch oder vegan, werden weniger Nutzpflanzen zur Deckung des Ernährungsbedarfs benötigt. Dieser Zusammenhang kann so veranschaulicht werden (IINAS, GEMIS 5 und ADEME, Agribalyse 3): Für 1 kg verzehrfertiges Schweinefleisch werden zum Beispiel etwa 7 kg Futtermittel benötigt. Produziert man anstatt dieser 7 kg Futtermittel direkt pflanzliche Nahrungsmittel, wird pro Kilogramm Nahrungsmittel deutlich weniger Ackerfläche und somit auch weniger Düngemittel benötigt, d.h. der Phosphatbedarf sinkt. Der mittlere Flächenverbrauch von 1 kg Rindfleisch beläuft sich auf etwa 38 m², der von Getreidesorten wie Reis auf etwa 1,7 m² und der von Gemüse wie z.B. Spinat auf 0,004 m². Da nicht nur Fleisch, sondern auch weitere tierische Erzeugnisse wie Eier (3 m²/kg) oder Milchprodukte (z.B. 6 m²/kg für Käse) relativ hohe Flächennutzungen erfordern, schont eine möglichst pflanzenbasierte Ernährungsweise den Düngemittelverbrauch am meisten.

Sowohl im Verhalten-Szenario als auch im Technologie-Szenario kann der Phosphatbedarf deutlich reduziert werden. Mit +11 % ist im Verhalten-Szenario ein stärkerer Rückgang möglich als es im Technologie-Szenario (+5 %) zu erwarten ist. Die stärkste Entspannung der Versorgungssituation kann im ambitioniertesten Mix-Szenario erreicht werden, in dem insgesamt +17 % des Baseline-Phosphatbedarfs eingespart werden kann. Da für die anderen relevanten Rohstoffe (vgl. Abbildung) der Ernährungssektor einen geringeren Anteil am Gesamtbedarf hat, können nur deutlich geringere Veränderungspotenziale von bis zu +3 % erreicht werden.

Tabelle 4-19: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Ernährungssektor

	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 % Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*1 / 5* ***Phosphat (+10 %)***	1 / 5 **Phosphat (+11 %)**	1 / 5 **Phosphat (+5 %)**	1 / 5 **Phosphat (+17 %)**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≤ -5 % Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	*0 / 5* n/v	0 / 5 n/v	0 / 5 n/v	0 / 5 n/v

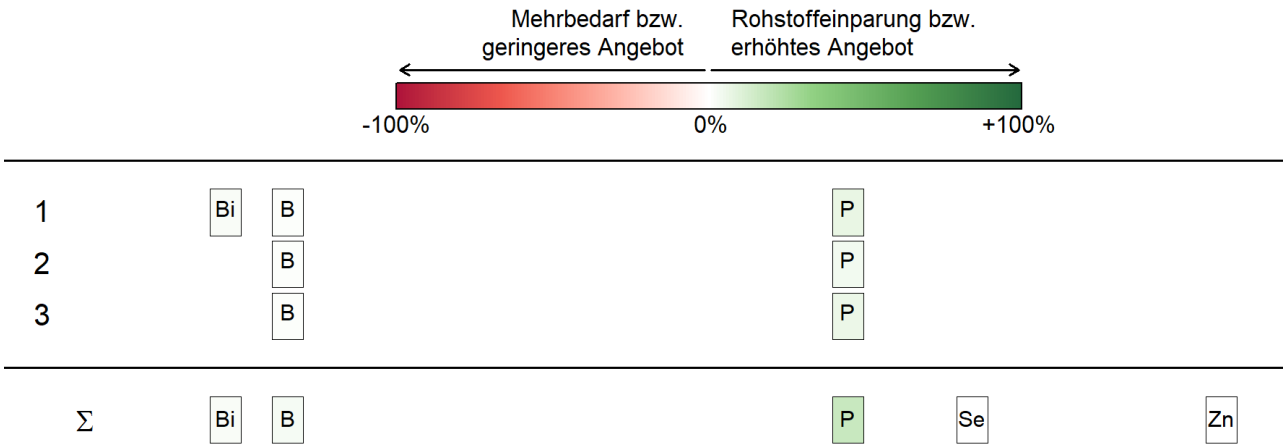
Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).

Quelle: Eigene Darstellung

Im Mix-Szenario führen alle drei Maßnahmen zu einer Reduktion des Phosphatbedarfs. Den größten Einfluss hat mit einem Veränderungspotenzial von +7 % dabei die Umstellung zur einer Planetary Health Diet (Maßnahme 1). Dahinter folgen mit ähnlich deutlichen Potenzialen von +6 % bzw. +5 % die Vermeidung von Lebensmittelabfällen (Maßnahme 3) und das Ersetzen von Fleisch durch synthetisches In-vitro-Fleisch (Maßnahme 2).

Abbildung zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1-3 zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-77: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Ernährungssektor (Mix-Szenario)



Hinweis: Bor (B) und Phosphor (P) werden nicht elementar, sondern Borate bzw. Phosphate betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2.5 Textilien

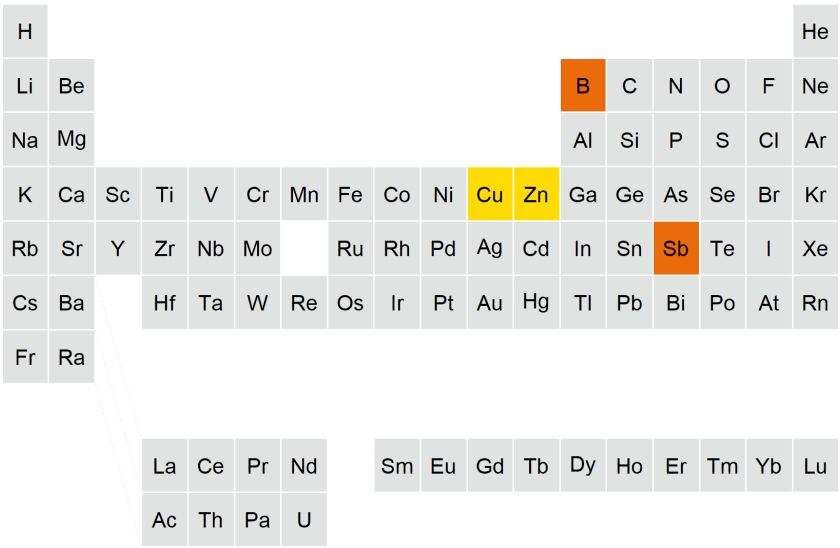
Der Textilsektor ist für keinen der 43 in dieser Studie betrachteten Rohstoffe ein mengenmäßig relevanter Anwendungsbereich. Textilien basieren zum Großteil auf organischen Materialien wie Baumwolle oder synthetischem Polymer. Die Verwendung von Metallen in Kleinteilen wie Knöpfen oder Reißverschlüssen fallen im Vergleich zu anderen Anwendungssektoren kaum ins Gewicht (Sektoranteile < 1 %). Die Nutzung von Antimon als Flammschutz in Spezialkleidung ist mit Blick auf den deutschen Gesamtbedarf an Antimon ebenfalls marginal. Zwar werden weltweit etwa 4 % der Düngemittel auf Baumwolle verwendet (International Fertilizer Association 2019, FAPRI-ISU 2011), jedoch bedarf die deutsche Wirtschaft keiner Rohstoffimporte, da die Baumwolle, die in Deutschland konsumiert wird, nicht in Deutschland angebaut wird. Der Textilsektor beeinflusst die Rohstoffversorgungssicherheit Deutschlands daher nur unwesentlich.

4.2.2.6 Möbel

Im Möbelsektor wurden die drei Massenrohstoffe Borate, Kupfer und Zink, sowie das Technologiemetall Antimon betrachtet. Borate und Antimon wurden 2020 von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft (siehe Abbildung 4-78). Kupfer und Zink wurden (zusätzlich) mit hohem bzw. mittlerem bis hohem Umweltgefährdungspotenzial gemäß Dehoust et al. (2020) eingestuft.

Etwa 11 % des nach Deutschland importierten Antimons fließt in den Möbelsektor, wo es hauptsächlich in Flammschutzmitteln in Polstermöbeln eingesetzt wird. Für den Gesamtverbrauch der drei betrachteten Massenrohstoffe fällt der Möbelsektor mit Anteilen von maximal 2 % kaum ins Gewicht.

Abbildung 4-78: Für den Möbelsektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Bor (B) wird nicht elementar, sondern als Borate betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c). Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-20 zeigt die Veränderungspotenziale mit Werten von ≥ +5 %. Nur im Verhalten- und Mix-Szenario kann die Versorgungssituation von Antimon deutlich entspannt werden. Ohne zusätzliche CE-Maßnahmen (Baseline-Szenario) wird durch einen leichten Anstieg der Möbelproduktion der Antimonbedarf leicht steigen (VP = -2 %, das entspricht einem Mehrbedarf von 2 %).

Tabelle 4-20: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Möbelsektor

	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*0 / 4*	0 / 4	1 / 4	1 / 4
Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*n/v*	**Antimon (+8 %)**	n/v	**Antimon (+8 %)**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	*0 / 5*	0 / 5	0 / 5	0 / 5
Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	n/v	n/v	n/v	n/v

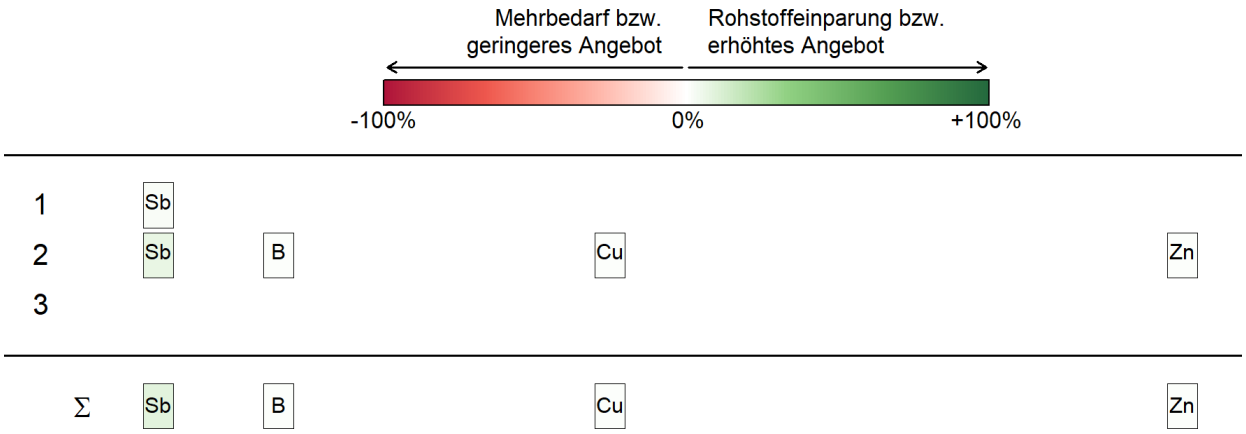
Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).

Quelle: Eigene Darstellung

Innerhalb des Mix-Szenarios kann die Maßnahme “Ecodesign” (Maßnahme 2) mit einem Veränderungspotenzial +7 % für Antimon den höchsten Wert erreichen. Geringere Effekte können bei einer erfolgreichen Lebensdauerverlängerung (Maßnahme 1) mit einem Veränderungspotenzial von +2 % für Antimon erzielt werden. Ein vermehrter Einsatz von Sekundärmaterial (Maßnahme 3) hat aus Sicht der Versorgungssicherheit keine direkten Effekte (vgl. Kapitel 3.5.6) und wurde daher nicht quantifiziert.

Abbildung 4-79 zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1-3 zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-79: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Möbelsektor (Mix-Szenario)



Hinweis: Bor (B) wird nicht elementar, sondern als Borate betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2.7 Beleuchtung

Aus dem Katalog kritischer und stark umweltbelastender Rohstoffe sind zehn für den Beleuchtungssektor relevant (siehe Tabelle 4-21). Davon wurden acht 2020 von der Europäischen Kommission als kritischer Rohstoffe erklärt. Aluminium und Silizium wurden wegen (zusätzlich) hohem bzw. mittlerem bis hohem Umweltgefährdungspotenzial gemäß Dehoust et al. (2020) ebenfalls betrachtet. Aufgrund ihrer spektroskopischen Eigenschaften sind seltene Erden für den Beleuchtungssektor von großer Bedeutung. Zudem sind die Technologiemetalle Gallium und Indium als Halbleitermaterialen für Leuchtdioden entscheidend. Borate und Quarzsand dienen zur Herstellung von Spezialglas. Wolfram wird für die Gasentladungslampen als Elektrodenmaterial auch nach Auslaufen der herkömmlichen Glühlampen weiter benötigt. Mit Anteilen von 25 %, 50 % und 100 % am Gesamtverbrauch Deutschlands ist der Beleuchtungssektor eine Hauptanwendung von importiertem Gallium, Yttrium und Europium.

Der technologische Wandel hin zur überwiegenden Nutzung von LED-Technologie wird die Rohstoffbedarfe des Beleuchtungssektors verändern. Der Anteil der in Verkehr gebrachten Gasentladungslampen (GELs) wird bis 2045 im Baseline-Szenario, d.h. ohne weiter umgesetzte CE-Maßnahmen von etwa 30 % auf 10 % sinken, während der LED-Anteil auf 90 % steigen wird. Halogenlampen und konventionelle Glühlampen werden auslaufen. Durch die Nutzung der neuen Technologien (v.a. Umstieg von GEL zu LED) wird sich die mittlere Lebens- und Nutzungsdauer der Lampen verlängern, und die Lampen werden seltener ausgetauscht werden. Aus diesem Grund werden 2045 voraussichtlich insgesamt 15 % weniger Lampen in Umlauf gebracht werden als im Status quo. Folglich wird die GEL-Produktion stärker zurückgehen als die LED-Produktion zunehmen wird.

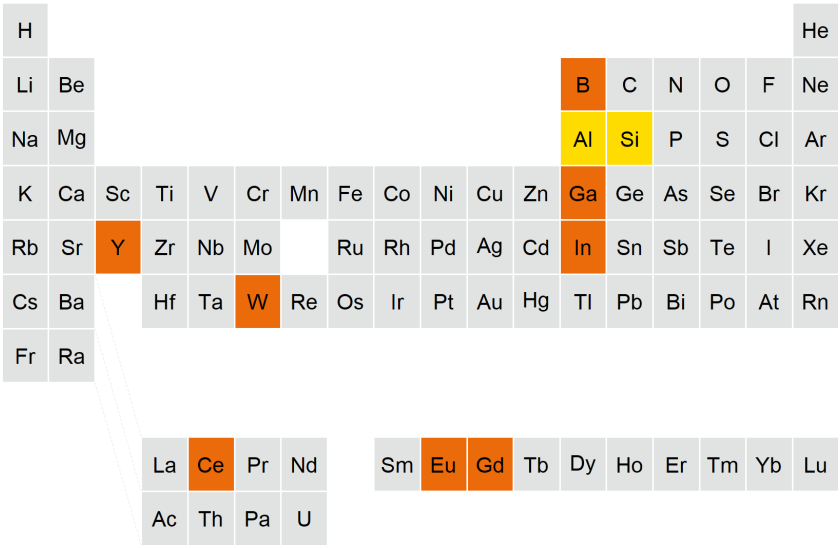
Durch die Umstellung werden bereits im Baseline-Szenario starke Veränderungen für zum Beispiel Europium erwartet. 100 % des nach Deutschland importierten Europiums fließt in den Beleuchtungssektor. Es wird zwar sowohl für LED-Technologie als auch für Gasentladungslampen weiterhin benötigt, der Bedarf wird aber dennoch durch den Rückgang der Lampenproduktion bis 2045 um 23 % zurückgehen. Auch für Gallium und Yttrium entspannt sich die Versorgungssituation mit Veränderungspotenzialen von +12 % und +6 %.

Da die auslaufenden Technologien bis zu einer vollendeten Umstellung weiterhin in Umlauf sind, können durchaus bedeutende Mengen seltener Erden und anderer Technologiemetalle zurückgewonnen werden.

Tabelle 4-21 zeigt einen Überblick über die Ergebnisse der einzelnen Szenarien. Im Mix-Szenario kann die Versorgungssituation von insgesamt drei der zehn relevanten Rohstoffe deutlich verbessert werden. Für Yttrium und Gallium können große Veränderungspotenziale von +80 % bzw. +36 % erreicht werden. Auch die Versorgungssicherheit von Gadolinium kann mit einem Veränderungspotenzial von +6 % deutlich entspannt werden. Die Veränderungspotenziale der anderen betrachteten Rohstoffe sind geringer, da der Beleuchtungssektor entweder einen geringeren Anteil am deutschen Gesamtverbrauch hat oder geringere Mengen an Rohstoffen aus den Lampen wiedergewonnen werden können.

Verhalten- und Mix-Szenario haben an den Verbesserungen des Mix-Szenarios einen etwa gleich großen Einfluss.

Abbildung 4-80: Für den Beleuchtungssektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Bor (B) und Silizium (Si) werden nicht elementar, sondern als Borate bzw. Quarzsand betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c). Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.
Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-21: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Beleuchtungssektor

	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*3 / 10*	2 / 10	2 / 10	3 / 10
Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	***Europium (+23 %)*** ***Yttrium (+12 %)*** ***Gallium (+6 %)***	**Yttrium (+48 %)** **Gallium (+22 %)**	**Yttrium (+53 %)** **Gallium (+24 %)**	**Yttrium (+80 %)** **Gallium (+36 %)** **Gadolinium (+6 %)**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	*0 / 10*	0 / 10	0 / 10	0 / 10
Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	n/v	n/v	n/v	n/v

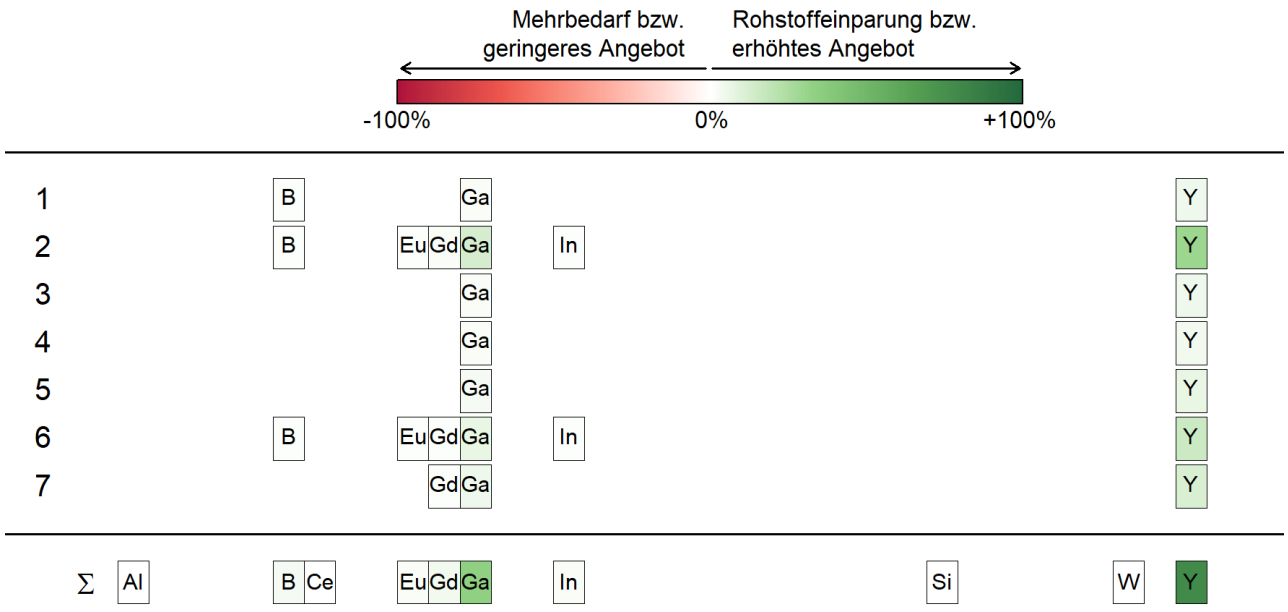
Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).
Quelle: Eigene Darstellung

Die bedeutendste Maßnahme ist die vermehrte stoffliche Verwertung von Altleuchten (Maßnahme 2). Dabei könnten bei erfolgreicher Umsetzung der Maßnahme 2045 +30 % des Jahresyttriumbedarfs, sowie +13 % des Jahresgalliumbedarfs Deutschlands aus Altlampen gewonnen und zur Verfügung gestellt werden. Zwei weitere wichtige Maßnahmen sind langlebiges Lampendesign (Maßnahme 6) und Beleuchtung als Dienstleistung (Maßnahme 7). Durch beide Maßnahmen verringert sich der jährliche Bedarf and Lampen und bei Beleuchtung als Dienstleistung werden zusätzlich noch vermehrt Altlampen gesammelt. Dadurch können gegenüber dem Baseline-Szenario für Yttrium Veränderungspotenziale von +16 % (langlebiges Design) bzw. +12 % (Beleuchtung als Dienstleistung) erreicht werden. Für Gallium ergeben sich Veränderungspotenziale von +7 % bzw. +5 %.

Für Yttrium erreichen auch die Maßnahmen zur Steigerung der Sammelquote (Maßnahme 1), zur Reduktion nicht-austauschbarer Leuchtmittel (Maßnahme 5), zum Verzicht auf Dekolampen (Maßnahme 4), sowie Materialeinsparungen bei der Lampenproduktion (Maßnahme 3) Veränderungspotenziale von ≥ +5 %.

Abbildung 4-81 zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1-7 zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-81: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Beleuchtungssektor (Mix-Szenario)



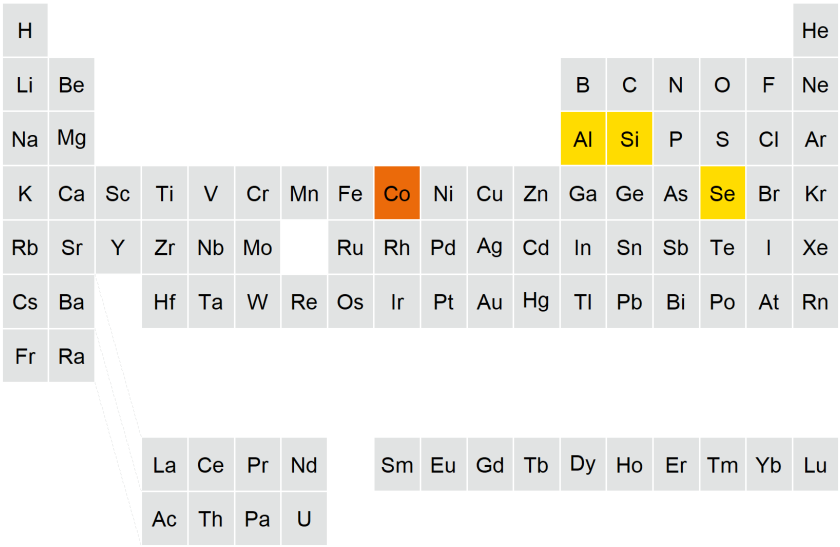
Hinweis: Bor (B) wird nicht elementar, sondern als Borate betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2.8 Verpackungen

Für die Modellierung der CE-Maßnahmen des Verpackungssektors wurden Verpackungen aus Glas, Blech, Aluminium, Kunststoffen, Papier, Pappe, Karton, Flüssigkarton, Holz und Kork betrachtet. Organische Materialien werden hier nicht betrachtet. Dagegen sind Aluminium und Glas für diese Analyse relevant. Zur Produktion von Behälterglas wird Quarzsand in großem Umfang als Siliziumdioxidquelle eingesetzt. Etwa 45 % der weltweiten Glasproduktion dient der Herstellung von Behälterglas (World Bank Group 2021). Selen wird als Färbungs- oder Entfärbungsmittel zugesetzt. Kobalt dient zur Blaufärbung von Glasbehältern, die den Inhalt vor UV-Strahlung schützen kann (Glass Packaging Institute 2023).

Aluminium, Silizium und Selen werden wegen (zusätzlich) hohem bzw. mittlerem bis hohem Umweltgefährdungspotenzial gemäß Dehoust et al. (2020) betrachtet.

Abbildung 4-82: Für den Verpackungssektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial)



Hinweis: Rohstoffe, die ein hohes Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission als kritisch eingestuft wurden, sind orange eingefärbt. Rohstoffe, die ein hohen Umweltgefährdungspotenzial aufweisen und von der Europäischen Kommission nicht als kritisch eingestuft wurden, sind gelb markiert. Silizium (Si) wird nicht elementar, sondern als Quarzsand betrachtet. Es wurden insgesamt 43 Rohstoffe betrachtet, deren Bereitstellung mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden sind. 31 dieser Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission 2020 als kritisch eingestuft (EC 2020c). Der Rohstoffkatalog (siehe Abbildung) wurde im Rahmen Vorstudie (Prakash et al. 2022) ausgearbeitet.
Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 4-22 zeigt einen Überblick der Szenarien. Ohne die Umsetzung von CE-Maßnahmen (d.h. Baseline-Szenario) wird für 2045 keine Veränderung von Bedarf oder lokalem Angebot der relevanten Rohstoffe erwartet. Im Verhalten-Szenario kann die Versorgungssituation von Quarzsand (VP = +5 %) entspannt werden. Im Technologie-Szenario werden Veränderungspotenziale von bis zu +4 % erreicht. Gehen Fortschritte in Verhalten und Technologie Hand in Hand, können Veränderungspotenziale von +5 % bis +8 % für drei der vier Rohstoffe (Aluminium, Quarzsand und Selen) erreicht werden.

Tabelle 4-22: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Verpackungssektor

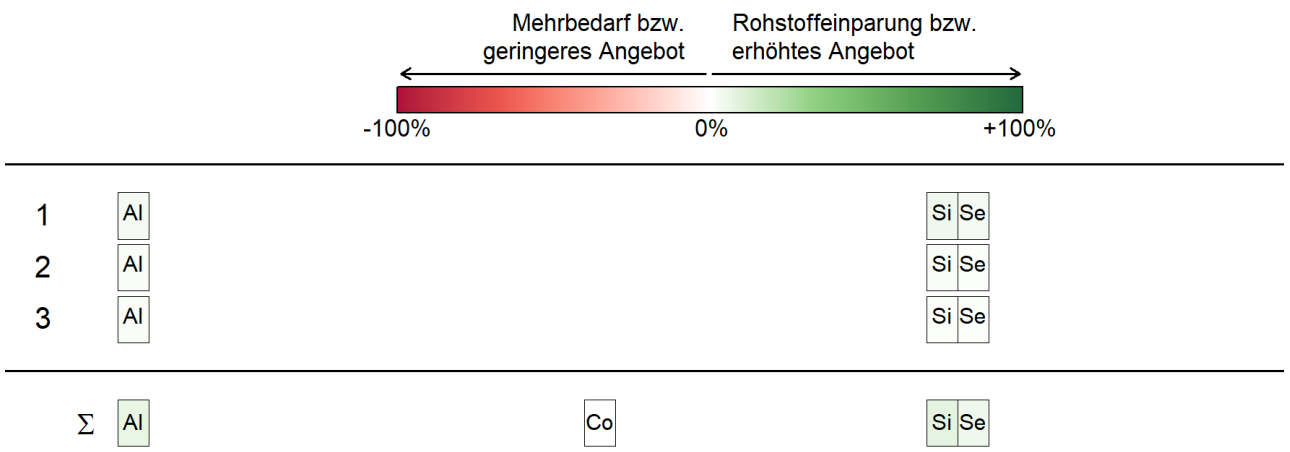
	Baseline*	**Verhalten**	**Technologie**	**Mix**
Anzahl Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*0 / 4*	1 / 4	0 / 4	3 / 4
Rohstoffe mit VP ≥ +5 %	*n/v*	Quarzsand (+5 %)	n/v	Aluminium (+8 %) Quarzsand (+8 %) Selen (+5 %)
Anzahl Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	*0 / 4*	0 / 4	0 / 4	0 / 4
Rohstoffe mit VP ≤ -5 %	n/v	n/v	n/v	n/v

Hinweis: EU-kritische Rohstoffe sind fett gedruckt. *Die kursiv gedruckten Veränderungspotenziale des Baseline-Szenarios beziehen sich auf den Rohstoffbedarf des Status quo. Die Veränderungspotenziale von Verhalten-, Technologie-, und Mix-Szenario beziehen sich auf den für 2045 erwarteten Rohstoffbedarf (Baseline).
Quelle: Eigene Darstellung

Das größte erreichte Veränderungspotenzial eines Rohstoffs durch eine einzelne Maßnahme ist +5 % für Quarzsand durch Maßnahme 1 (Reduktion von Verpackungen durch Verhaltensänderung). Die drei Maßnahmen erzielen zwar individuell für keinen der weiteren relevanten Rohstoffe große Veränderungspotenziale (VP ≤ +3 %), jedoch kann die Kombination der drei Maßnahmen für drei der vier relevanten Rohstoffe Veränderungspotenziale von +5 % bis +8 % erreichen. Um die Versorgungslage entspannen zu können, müssen demnach Verhaltensmuster und technischer Fortschritt in der Reduktion und Wiederverwertung von Verpackungen einhergehen.

Abbildung 4-83 zeigt einen Überblick über die Beiträge der einzelnen Maßnahmen 1-3 zu den Veränderungspotenzialen des Mix-Szenarios.

Abbildung 4-83: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Verpackungssektor (Mix-Szenario)



Hinweis: Silizium (Si wird nicht elementar, sondern als Quarzsand betrachtet.
Quelle: Eigene Darstellung

4.3 Soziökonomische Effekte

4.3.1 Einführung

Neben den Umweltwirkungen werden für eine umfassende Wirkungsanalyse von Circular Economy Strategien auch sozioökonomische Effekte betrachtet. Im Folgenden werden für den Status quo und die MDCE-Szenarien Baseline, Technologie, Verhalten und Mix dargestellt, wie sich Veränderungen der deutschen Nachfrage in den betrachteten Sektoren direkt und indirekt auf die Bruttowertschöpfung und den Arbeitskräftebedarf in Deutschland auswirken. Dies stellt einen Unterschied zu den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Umweltwirkungen dar, die global erfasst werden.

Während die Umweltindikatoren detailliert nach Sektoren und Maßnahmen aufgeschlüsselt sind, werden die sozioökonomischen Indikatoren auf Ebene der Szenarien dargestellt und interpretiert. Damit sollen mögliche Fehlinterpretationen vermieden werden. So führen beispielsweise Nachfrageänderungen im Bereich Fahrzeugbau aufgrund von Verlagerung auf den öffentlichen Verkehr nicht nur zu direkten Änderungen im Fahrzeugbau, sondern auch zur Verringerung der Nachfrage nach Kfz-Handel, zu einer geringeren Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen für den Betrieb der Fahrzeuge (Reparatur, Versicherung, Kraftstoffe bzw. Strom etc.), zu einer höheren Nachfrage nach öffentlichem Verkehr und dafür benötigter Infrastruktur, sowie zu vielen weiteren vorgelagerten Effekten. Die sozioökonomischen Ergebnisse verteilen sich somit auf viele verschiedene Wirtschaftszweige, und setzen sich aus vielfältigen positiven und negativen Nachfrageimpulsen zusammen.

Auch eine aggregierte Darstellung kann eine gute Orientierung über die gesellschaftlichen Veränderungen geben, die sich durch Circular Economy Strategien ergeben. Dies wird auch dadurch ermöglicht, dass die Gesamteffekte auf Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf je Szenario noch weiter differenziert werden: Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen, sowie nach Löhnen und Gewinnen, Arbeitskräftebedarfe nach Wirtschaftsbereichen ebenso wie nach Qualifikationsniveaus und Geschlechteranteilen. Dadurch können Verlagerungseffekte gezeigt werden.

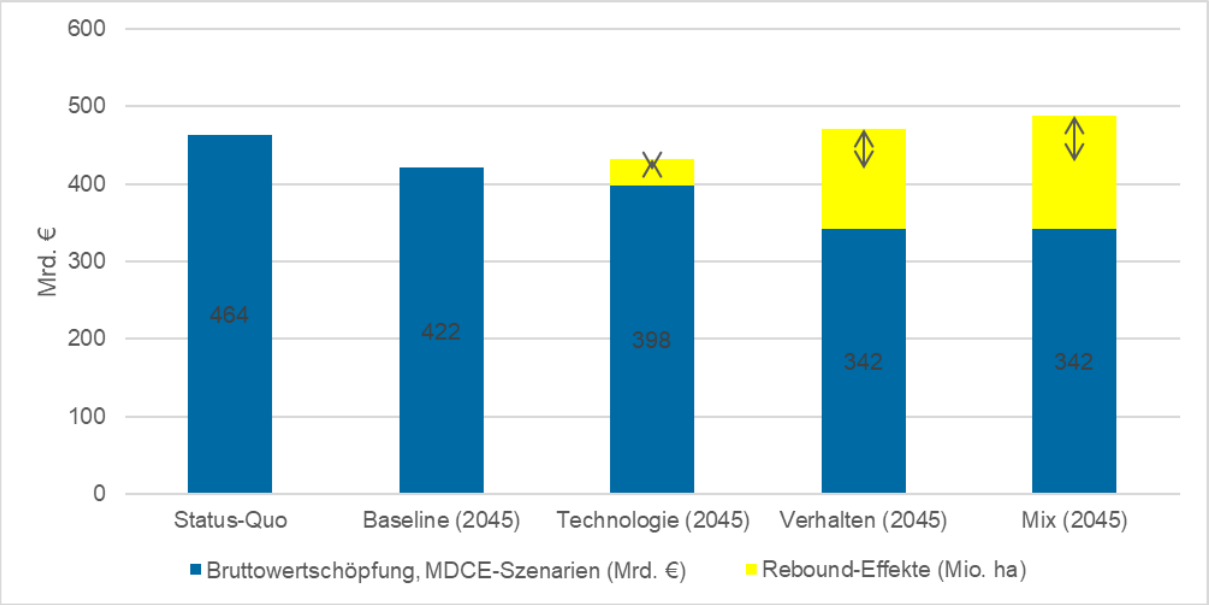
4.3.2 Gesamtüberblick: Bruttowertschöpfung & Arbeitskräftebedarf

In Abbildung 4-84 ist die Bruttowertschöpfung und in Abbildung 4-85 der Arbeitskräftebedarf in Deutschland für die unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Die Bruttowertschöpfung umfasst in erster Linie Löhne, Abschreibung und Gewinne, sie wird in Mrd. € angegeben. Arbeitskräftebedarf wird in Vollzeitäquivalenten angegeben. Diese Zahl ist geringer als die Anzahl beschäftigter Personen. Zwei Personen, die jeweils zu 50 % Teilzeit arbeiten, ergeben beispielsweise ein Vollzeitäquivalent.

Die Effekte auf die Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf ergeben sich durch Änderungen in der (deutschen) Nachfrage in den betrachteten neun Sektoren. **Die dargestellten Werte stellen nicht die Wertschöpfung oder den Arbeitskräftebedarf der deutschen Gesamtwirtschaft insgesamt dar, da der Fokus in dieser Studie auf Konsumgütern liegt**. Beispielsweise spielt der Export eine wichtige Rolle für Deutschland, bei den Investitionen wurden zwar Gebäude und Pkw betrachtet, nicht jedoch Maschinen und Ausrüstungen. Ein Großteil der privaten und öffentlichen Nachfrage nach Dienstleistungen wurde ebenfalls nicht betrachtet. Hier dargestellt werden Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf, die direkt und indirekte mit der (inländischen) Nachfrage der in vorliegender Studie betrachteten Güter verbunden sind. So belief sich die gesamtdeutsche Wertschöpfung im Vor-Pandemie-Jahr 2019 auf 3130 Mrd. € und ist damit um ein Vielfaches höher als die für den Status quo ermittelten 465 Mrd. €. Auch der gesamtdeutsche Arbeitskräftebedarf lag im

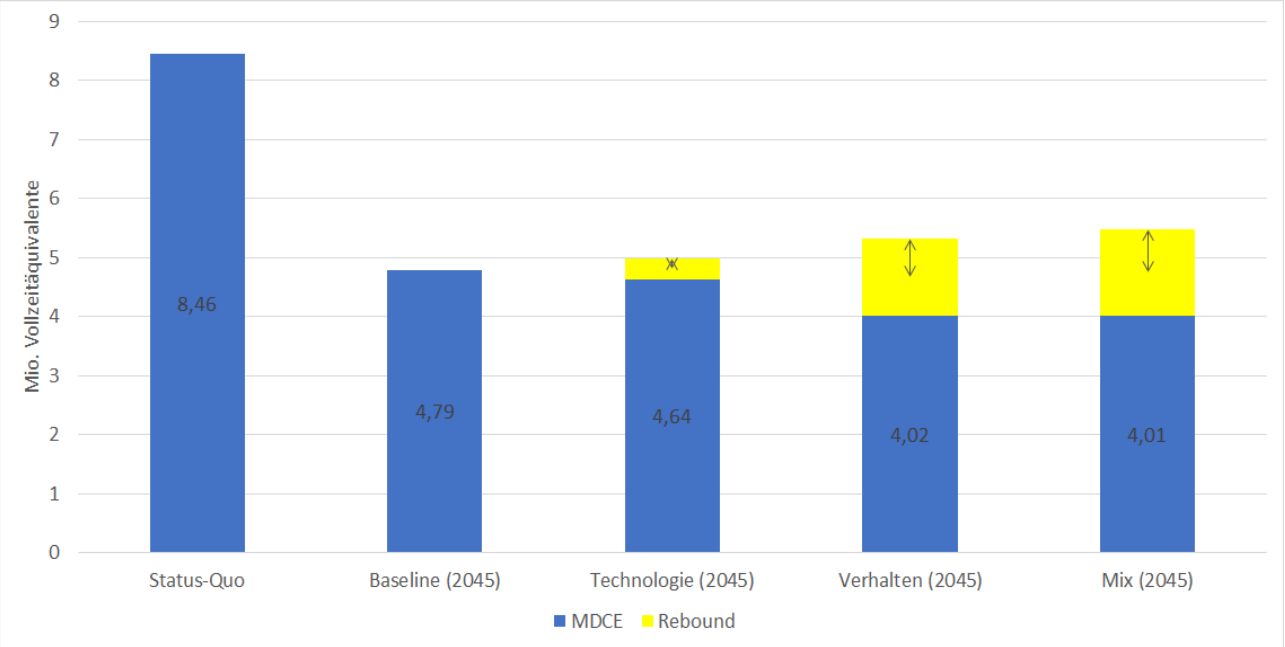
Jahr 2019 mit ca. 37 Mio. Vollzeitäquivalenten deutlich über dem für den Status quo ermittelten 8,5 Mio. Vollzeitäquivalenten.

Abbildung 4-84: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung in Mrd. €



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-85: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf in Mio. Vollzeitäquivalenten



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Bereits zwischen Status quo und dem Baseline-Szenario 2045 reduziert sich die Bruttowertschöpfung um 9 % auf 423 Mrd. € (vgl. Kapitel 3.1 zur Ausgestaltung des Baseline-Szenarios). Zu diesem

Rückgang trägt insbesondere ein deutlicher Nachfragerückgang im Hochbau bei, der unter anderem auf den demographischen Wandel zurückgeführt werden kann. Dieser wirkt sich stärker aus als die zusätzliche Nachfrage in anderen Bereichen, wie z.B. nach IKT.

Auch der Arbeitskräftebedarf verringert sich im Baseline-Szenario deutlich um 43 % im Vergleich zum Status quo. Die beschriebenen Nachfragerückgänge führen jedoch nur zu einem Rückgang von etwa 4 %. Die entscheidende Rolle spielt ein weiterer Effekt: im Jahr 2045 ist die unterstellte Arbeitsproduktivität deutlich höher als für den Status quo. Dies bedeutet, dass die gleiche Wertschöpfung mit deutlich weniger Arbeitskräften erbracht werden kann und beruht auf den Rahmendaten des Projektionsberichts 2021 (Repenning et al. 2021), die für das Baseline-Szenario zugrunde gelegt wurden. Bis 2045 wird hier mit einem beständigen Wirtschaftswachstum gerechnet, bei gleichzeitig aufgrund des demographischen Wandels leicht sinkenden Arbeitskräftepotenzial und damit hohen Anforderungen in Bezug auf das Wachstum der Arbeitsproduktivität. Auch wenn beispielsweise die in hohem Tempo voranschreitende Digitalisierung durchaus zu einem Anstieg der Arbeitsproduktivität beiträgt, so bleibt diese Rahmenbedingung ambitioniert. Hinzu kommt, dass viele Wirtschaftsbereiche bereits heute einen Fachkräftemangel aufweisen, das vom Rückgang im Baseline-Szenario stark betroffene Baugewerbe ist ein solcher Bereich. In diesem Sinne sollte eine Reduktion des Arbeitskräftebedarfs nicht als Abweichung vom Ziel der Vollbeschäftigung interpretiert werden, sondern sollte eher als Entlastung des Arbeitsmarktes im Hinblick auf Fachkräftemangel und sinkendem Arbeitskräftepotenzial.

Änderungen zwischen der Baseline und den MDCE-Szenarien ergeben sich durch eine Änderung in Nachfragehöhe (beispielsweise bei lebensdauerverlängernden Maßnahmen, die zu weniger Konsumnachfrage führen) und Nachfragestruktur (beispielsweise bei Substitution von Primär- durch Sekundärproduktion oder von Autos mit Verbrennungsmotor durch E-Autos). Während nachfragereduzierende Maßnahmen auch Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf in direkt und indirekt betroffenen Wirtschaftsbereichen reduzieren, führen auf die Nachfragestruktur abzielende Maßnahmen je nach betroffenem Wirtschaftsbereich sowohl zu positiven als auch zu negativen Effekten.

Im Mix-Szenario und im Verhalten-Szenario spielen Nachfragerückgänge durch auf Vermeidung fokussierte Maßnahmen eine besonders große Rolle, wohingegen im Technologie-Szenario Substitution wichtiger ist. Entsprechend fällt die Reduzierung der Bruttowertschöpfung in den direkt und indirekt betroffenen Wirtschaftsbereichen gegenüber der Baseline im Verhalten- und Mix-Szenario mit -19 % deutlich stärker aus als im Technologie-Szenario mit -6 %. In Bezug auf Arbeitskräftebedarf sieht es ähnlich aus, wobei die Effekte mit -16 % im Verhalten- und Mix-Szenario und -3,5 % im Technologie-Szenario etwas geringer sind. Dies deutet daraufhin, dass eine leichte Verschiebung hin zu beschäftigungsintensiveren Bereichen stattfindet.

Während sich oben beschriebene Änderungen ausschließlich auf die Produktion der Güter beziehen, die im Rahmen der vorliegenden Studie vertieft betrachtet wurden, geht der Einbezug des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen darüber hinaus. Hierbei wird der Effekt berücksichtigt, dass aufgrund der geringeren Ausgaben für die betrachteten Güter Einkommen frei wird, das im Sinne der ökonomischen Kreislauflogik wiederum zu mehr Nachfrage führt. Die absolute Höhe des Rebounds in Bezug auf Wertschöpfung und Beschäftigung hängt zum einen davon ab, wieviel freigewordenes Einkommen zur Verfügung steht, und zum anderen, welche Güter oder Dienstleistungen nachgefragt werden. Aus diesem Grund sind in Abbildung 4-84 und Abbildung 4-85 Bandbreiten angegeben (der gelbe Kasten zeigt die zusätzliche Wertschöpfung / Arbeitskräftebedarf, der schwarze Pfeil die Bandbreite). Im Mix-Szenario ist das freiwerdende Einkommen am höchsten (170 Mrd. €), im Verhalten-Szenario nur etwas geringer (150 Mrd. €), im Technologie-Szenario (40 Mrd. €) deutlich geringer.

Der obere Rand des dargestellten Rebounds wird erreicht, wenn das freiwerdende Einkommen für Konsumbereiche ausgegeben wird, die noch nicht mit CE-Maßnahmen abgedeckt sind, vornehmlich Dienstleistungen aus dem Bereich Gesundheit, Bildung, Kultur und Freizeit. Hierbei ist zu beachten, dass durch dieses Vorgehen im Vergleich zur Baseline ein deutlich höherer Anteil der Nachfrage im Inland wirksam wird: die wegfallende Nachfrage betrifft Güter, die zu Teilen importiert werden, die hinzukommende Nachfrage betrifft im Inland erbrachte Dienstleistungen. Dieses Szenario zeichnet sich für Mix+Rebound durch eine um 14 % höhere Wertschöpfung und einen um 11 % höheren Arbeitskräftebedarf im Vergleich zur Baseline aus. Die direkten negativen Effekte bei einer ausschließlichen Betrachtung der betroffenen Bereiche werden überkompensiert. Wird das freigewordene Einkommen hingegen beispielsweise für vermehrte Investitionsnachfrage (ohne Gebäude) genutzt, so fällt die Wirkung dieser zusätzlichen Nachfrage auf Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf geringer aus (unterer Rand des dargestellten Rebounds) und liegt etwa auf dem Niveau des Baseline-Szenarios. Allerdings sollte beachtet werden, dass über die Nachfragewirkung hinausgehende gesamtwirtschaftliche Effekte von Investitionen (Innovationseffekte, Außenhandelseffekte, Produktivität etc.) nicht berücksichtigt sind.

Bei einer gemeinsamen Betrachtung von sozioökonomischen und ökologischen Indikatoren sollte beachtet werden, dass auch die ökologischen Wirkungen im Technologie-Szenario geringer ausfallen als in Verhalten- und Mix-Szenario. Die relative Reduktion der sozioökonomischen Indikatoren im Vergleich zur Baseline fällt in allen Szenarien geringer aus als die Umwelteffekte. Zwar führt der Rebound durch freiwerdendes Einkommen dazu, dass die Reduktion bei den ökologischen Indikatoren Treibhausgasemissionen, Ressourcennutzung und Landnutzung im Szenario Mix+Rebound geringer ausfällt als im Mix-Szenario. Insgesamt kommt es aber immer noch zu einer deutlichen Reduktion im Vergleich zum Baseline-Szenario, wohingegen Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf gleichauf oder höher liegen.

4.3.3 Strukturelle Effekte: Bruttowertschöpfung & Arbeitskräftebedarf

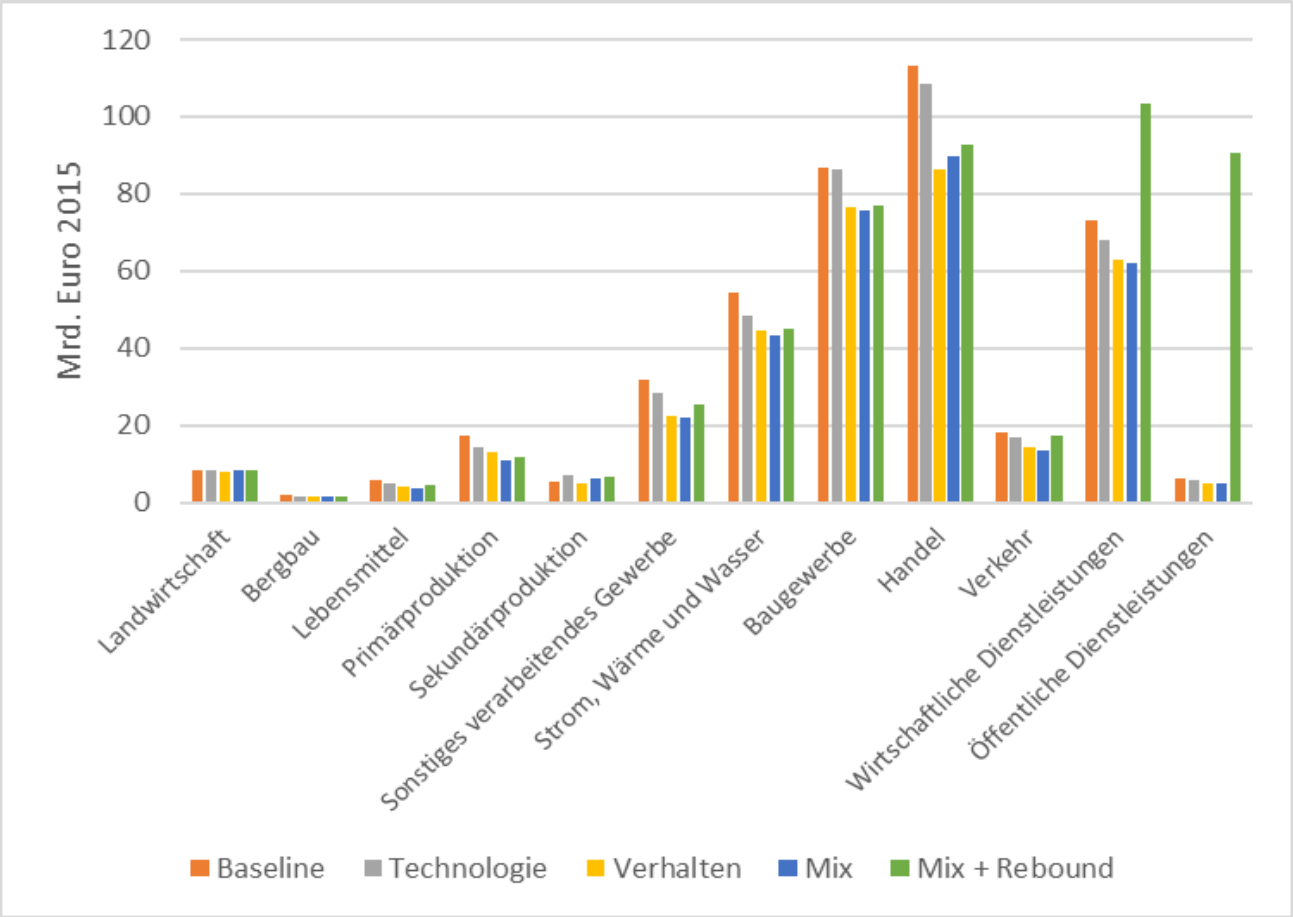
Da es sich bei Circular Economy um eine weitrechende Transformation unserer Art zu konsumieren und zu produzieren handelt, liegt es nahe, dass damit ein Strukturwandel verbunden ist. Dieses Kapitel behandelt zunächst die Frage, wie unterschiedliche Wirtschaftsbereiche durch die modellierten CE-Maßnahmen in Bezug auf Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf betroffen sind. Darüber hinaus wird analysiert, wie sich diese strukturellen Änderungen auf weitere Aspekte auswirken: mit Blick auf die Änderung der Wertschöpfung wird die Verteilung zwischen Gewinnen und Abschreibungen einerseits und Löhnen andererseits untersucht, mit Blick auf den Arbeitskräftebedarf die Verteilung auf unterschiedliche Qualifikationsniveaus und Geschlechteranteile.

Bruttowertschöpfung

Die Abbildung 4-86 zeigt für die in den MDCE-Szenarien adressierten Nachfragebereiche die direkt und indirekt damit verbundene Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen. Es handelt sich damit nicht um eine Darstellung der Gesamtwirtschaft, sondern stellt lediglich einen Teilbereich dar.

Im dargestellten Szenario Mix+Rebound wurde angenommen, dass das freigewordene Einkommen in nicht direkt durch die CE-Maßnahmen abgedeckte Konsumbereiche fließt. Diese Variante des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen wurde für die vertiefte Analyse der strukturellen Effekte ausgewählt, da es die größten Potenziale bietet (geringste zusätzliche Umweltkosten, höchste zusätzliche Wertschöpfung/Arbeitskräftebedarf). Andere Varianten des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen, etwa die vermehrte Nachfrage nach Investitionen, sind hier nicht dargestellt.

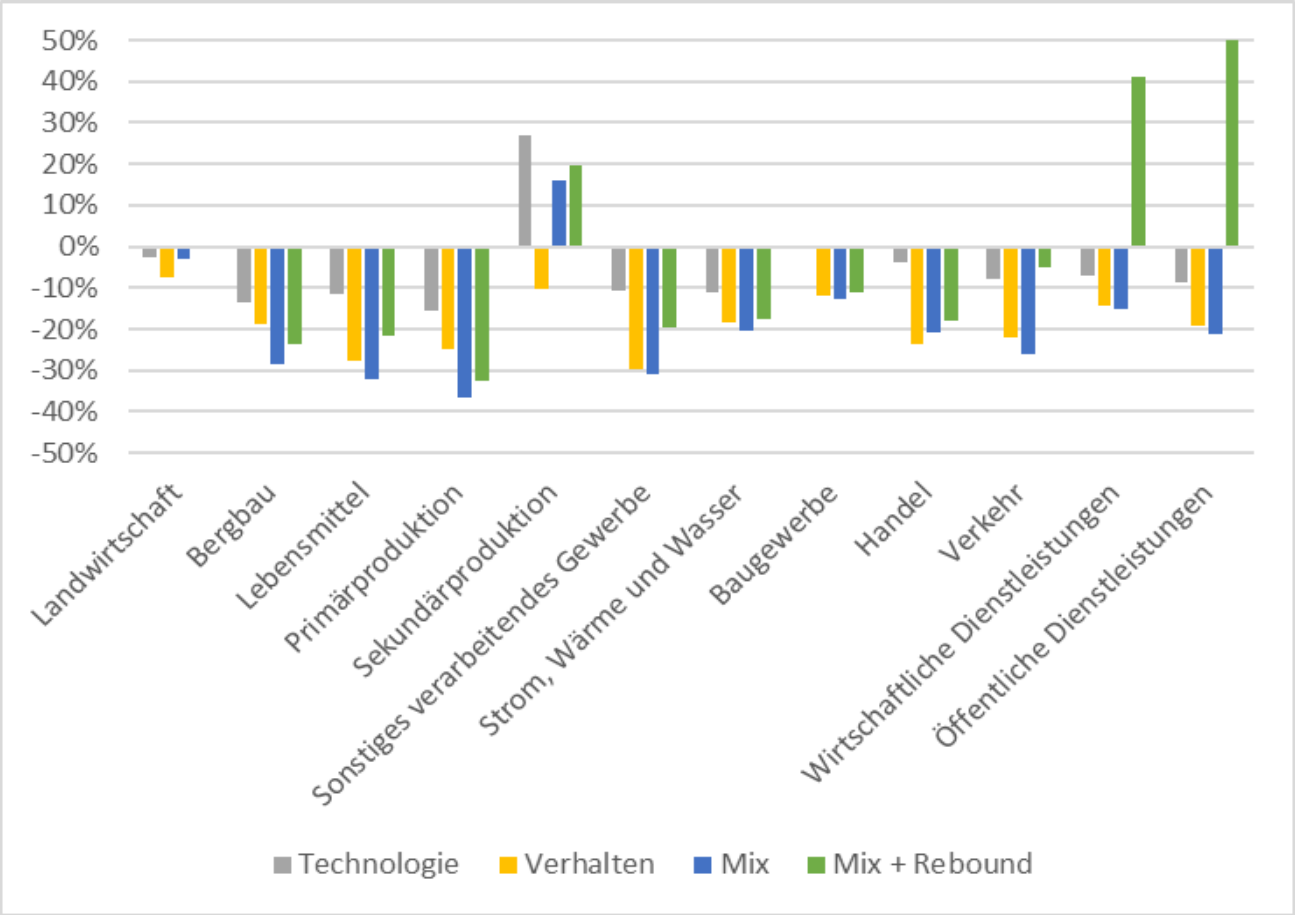
Abbildung 4-86: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – absolut in Mrd. € ggü. Baseline



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 4-87 sind hingegen die relativen Veränderungen in den MDCE-Szenarien gegenüber der Baseline dargestellt. Auch hier handelt es sich um eine Teilbetrachtung und Veränderungsraten dürfen nicht für den gesamten Wirtschaftsbereich verallgemeinert werden. Änderungen gegenüber der Baseline innerhalb eines Wirtschaftsbereichs können sich aus positiven wie aus negativen Effekten zusammensetzen. Neben direkten Effekten durch die Nachfrageänderung sind auch indirekte Änderung aufgrund der Vorleistungsverflechtung mit abgebildet.

Abbildung 4-87: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – Relative Änderung ggü. Baseline in %



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Der Nachfragerückgang durch auf Vermeidung fokussierte CE-Maßnahmen in allen betrachteten Konsumbereichen dominiert die Ergebnisse. Besonders ausgeprägt ist dies im Verhalten-Szenario. Im Technologie-Szenario hingegen spielen auch strukturverändernde Maßnahmen eine wichtige Rolle und auf Vermeidung fokussierte CE-Maßnahmen sind weniger stark ausgeprägt. Das Mix-Szenario vereint die auf Vermeidung fokussierte CE-Maßnahmen aus dem Verhalten-Szenario und die strukturverändernden Maßnahmen des Technologie-Szenarios.

Die Produktion von Sekundärrohstoffen nimmt für die betrachteten Nachfragebereiche in den Szenarien Mix und Technologie im Vergleich zur Baseline zu. Im Technologie-Szenario (+27 %) ist dies stärker ausgeprägt als im Mix-Szenario (+16 %). Das Verhalten-Szenario erfährt sogar einen Rückgang an Sekundärrohstoffproduktion im Vergleich zur Baseline (-10 %). Dies lässt sich mit dem insgesamt geringeren Produktionsniveau erklären, wodurch sowohl Bedarf als auch Angebot an Sekundärrohstoffen sinkt (nicht produzierte Güter benötigen weder Rohstoffe noch liefern sie Ausgangsstoffe für die Sekundärrohstoffproduktion in einer Kreislaufwirtschaft). Im Mix-Szenario wird dieser negative Effekt auf die Sekundärrohstoffproduktion überkompensiert durch positive Effekte aufgrund höherer Sekundärrohstoffanteile im Vergleich zur Baseline, wie sie auch im Technologie-Szenario abgebildet sind.

Analog zur Entwicklung bei den Sekundärrohstoffen geht die Produktion von Primärrohstoffen zurück. Besonders ausgeprägt ist dies für das Mix-Szenario (-37 %), dies stellt relativ gesehen auch den stärksten Rückgang dar. Im Mix-Szenario kommen Substitution durch Sekundärrohstoffe und insgesamt reduzierte Produktionsmengen zusammen. Der Bergbau stellt einen wichtigen Vorleistungsbereich für die Produktion von Primärrohstoffen ebenso wie für das Baugewerbe dar und ist somit indirekt betroffen.

Die Produktion von Lebensmitteln erfährt einen deutlichen Wertschöpfungsrückgang (bis zu -32 % im Mix-Szenario), wohingegen die Änderungen im Bereich der Landwirtschaft (bis zu -7 %) eher gering ausfallen. Dies lässt sich damit erklären, dass ein Großteil der Wertschöpfung im Bereich der Lebensmittelproduktion auf die Herstellung von Fleisch- und Milchprodukten entfällt, der durch die CE-Maßnahmen deutlich zurückgeht. Dahingegen spielt für die Landwirtschaft der Anbau von Obst und Gemüse eine wichtige Rolle für die Wertschöpfung, der durch die CE-Maßnahmen zunimmt und die Rückgänge im Bereich Tierhaltung teilweise kompensiert.

Im sonstigen verarbeitenden Gewerbe sorgen zwei Effekte für den Rückgang der Wertschöpfung. Zum einen bewirken CE-Maßnahmen, die die inländische Nachfrage nach Fahrzeugen, IKT und Haushaltsgeräten, Möbeln und Kleidung reduzieren, einen direkten Rückgang der Produktion. Zum anderen sind viele der hier zusammengefassten Wirtschaftsbereiche auch indirekt betroffen.

Im Baugewerbe ist der Effekt der CE-Maßnahmen im Vergleich zu den anderen Wirtschafsbereichen eher gering (bis zu -13 % im Mix-Szenario). Hier werden vor allem Nachfrageänderungen in der Bautätigkeit deutlich, wohingegen Veränderung bei den verwendeten Materialien in anderen Bereichen sichtbar werden. Im Verhalten- und Mix-Szenario führt die Reduktion von Wohn- und Büroflächen zu einem entsprechenden Rückgang, wohingegen das Technologie-Szenario diese Maßnahme nicht enthält. Allerdings wurde bereits für das Baseline-Szenario ein starker Rückgang im Hochbau (unter anderem aufgrund des demographischen Wandels) unterstellt und die zusätzliche Reduktion ist begrenzt.

Der Handel trägt absolut gesehen einen großen Anteil an der Wertschöpfung, die mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien verbunden ist (vgl. Abbildung 4-87). Dies liegt daran, dass die inländische Nachfrage nach den in der vorliegenden Studie betrachteten Gütern sowohl einen Effekt auf den Handel als auch auf die Produktion der Güter hat. Es ist jedoch zu beachten, dass nur ein Teil der Güter im Inland produziert wird, ein anderer Teil wird importiert. Der Handel ist hingegen komplett inländisch. Bei einer reinen Betrachtung der Wertschöpfung in Deutschland verschiebt sich der Anteil somit in Richtung Handel. Die betrachteten Güter weisen teilweise sehr hohe Handelsspannen auf (bis zu 50 %). Ein Nachfragerückgang führt somit auch zu einem direkten Rückgang der Wertschöpfung im Handel. Hinzu kommen indirekte Effekte, da der Handel stark mit anderen Wirtschaftsbereichen verflochten ist.

Die negativen Effekte auf den Handel durch die nachfragereduzierenden Maßnahmen werden nur teilweise durch positive Effekte kompensiert. Diese treten beispielsweise auf im Bereich der Reparatur-Dienstleistungen, die (basierend auf der Systematik der Wirtschaftszweige in EXIOBASE) dem Handel zugeordnet werden. Sie entstehen auch durch die Maßnahmen im Verpackungs-Sektor, da der Personaleinsatz (und damit auch die an Löhne gebundene Wertschöpfung) in Unverpackt- und Mehrwegsystemen höher ist als bei einem hohen Anteil von Einwegverpackungen (vgl. hierzu u.a. Gsell et al. 2022 und Dehoust et al. 2009). Diese positiven Effekte spielen im Mix-Szenario eine größere Rolle als im Verhalten-Szenario, weshalb die Effekte im Handel im Verhalten-Szenario den größten negativen Effekt aufweisen (-24 %).

Bei den Verkehrsdienstleistungen werden direkte positive Effekte durch die Verschiebung vom motorisierten Individualverkehr auf den öffentlichen Verkehr überkompensiert durch indirekte negative

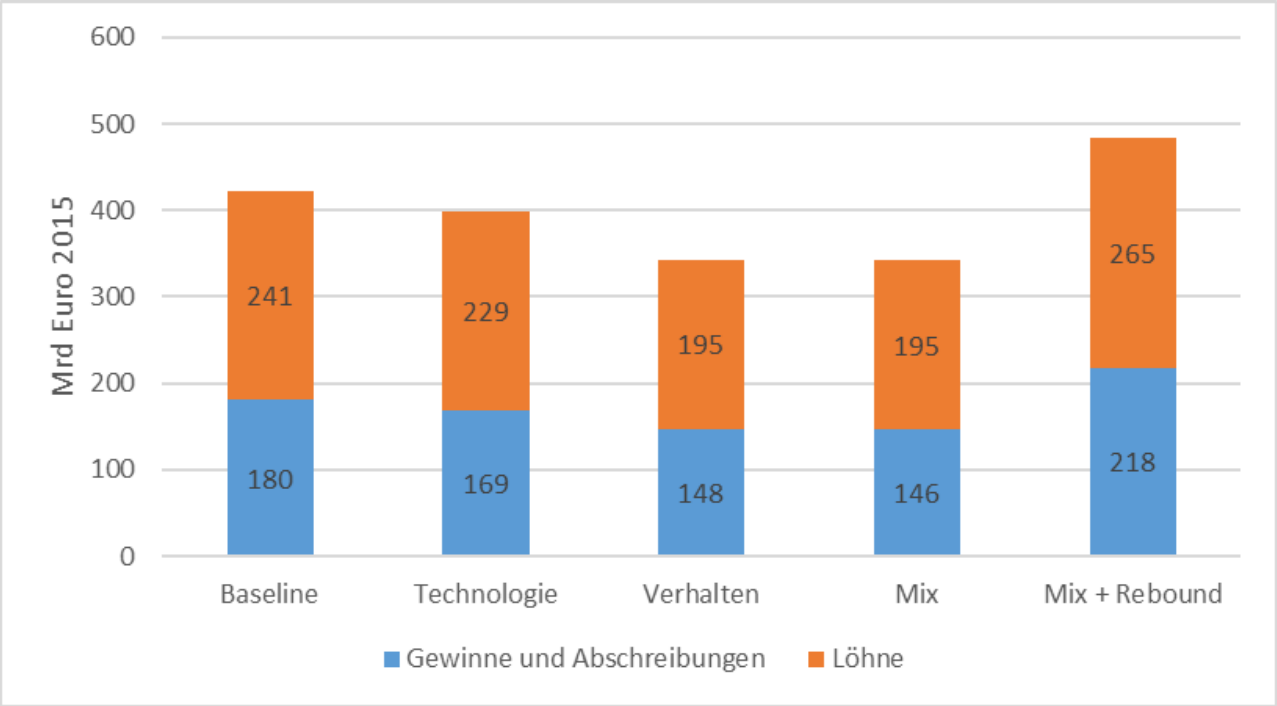
Effekte. Diese entstehen, weil Verkehrsdienstleistungen eine wichtige Vorleistung für eine Reihe der negativ betroffenen Bereiche, insbesondere des Handels, darstellen.

Die Wertschöpfungsverluste bei den wirtschaftlichen Dienstleistungen sind durch die CE-Maßnahmen im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen etwas geringer (bis zu -15 %). Dies liegt unter anderem daran, dass die Maßnahmen teilweise so wirken, dass Produktion durch eine Maßnahme reduziert wird und eine Dienstleistung stärker nachgefragt wird. Andererseits ist der Dienstleistungsbereich durch seine Verflechtung mit anderen Wirtschaftsbereichen stark indirekt durch Nachfragereduzierende Maßnahmen betroffen, die durch die positiven Effekte nicht vollständig kompensiert werden können. Die öffentlichen Dienstleistungen sind vor allem indirekt betroffen, aufgrund der fehlenden kompensierenden direkten positiven Effekten etwas stärker als die wirtschaftlichen Dienstleistungen (bis zu -21 %).

Im Mix-Szenario inklusive Rebound wird das freigewordene verfügbare Einkommen in nicht durch CE-Maßnahmen regulierten Konsumbereichen ausgegeben. Dies sind vor allem Dienstleistungsbereiche, weshalb diese einen starken Zuwachs erfahren. Durch indirekte Effekte verzeichnen auch die produzierenden Bereiche in diesem Szenario zusätzliche Wertschöpfung.

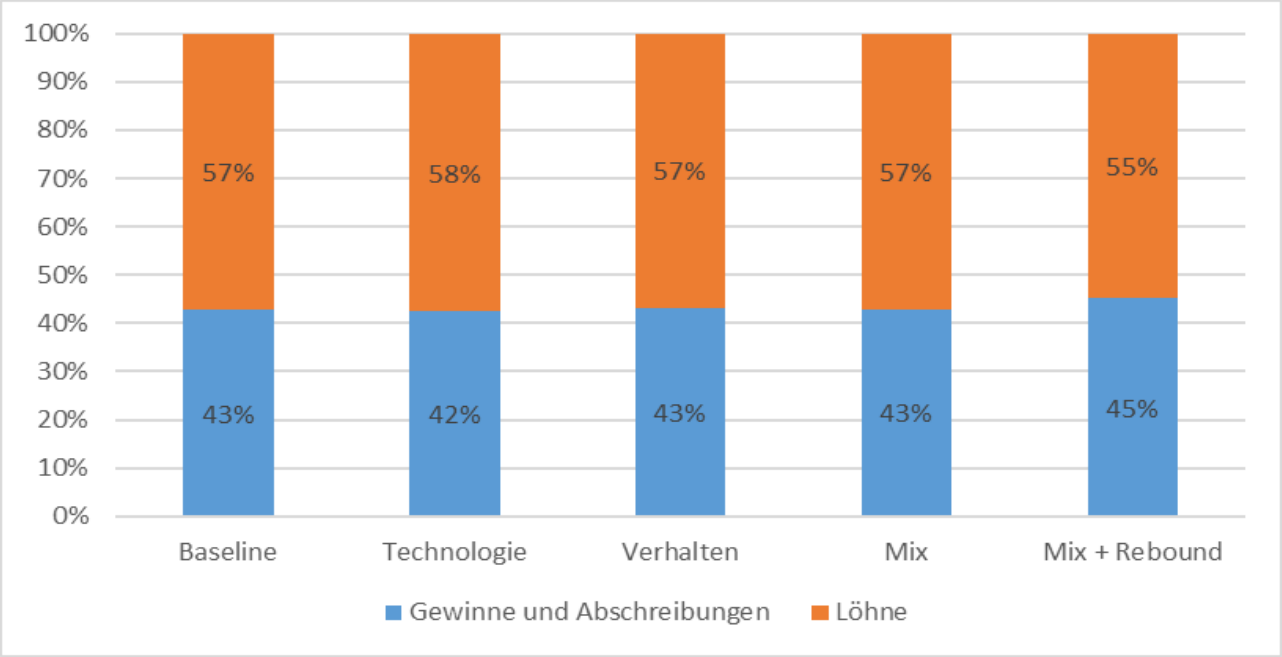
Da sich die Wertschöpfung der einzelnen Wirtschaftsbereiche auch unterschiedlich auf Kapital (Gewinne und Abschreibungen) und Arbeit (Löhne) verteilt, können strukturelle Änderungen zu einer Verschiebung der Anteile dieser beiden Faktoren an der gesamten Wertschöpfung führen. In Abbildung 4-88 und Abbildung 4-89 ist die mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien verbundene Wertschöpfung entsprechend aufgeteilt dargestellt (absolut bzw. anteilig). Es wird deutlich, dass in den MDCE-Szenarien Verhalten und Mix ohne Rebound die Aufteilung nahezu unverändert bleibt – die Verluste verteilen sich gleichermaßen auf Gewinne und Löhne. Im Szenario Technologie ohne Rebound verschieben sich die Anteile marginal zu Löhnen – in diesem Szenario sind also Bereiche mit einem höheren Lohnanteil an der Wertschöpfung etwas weniger stark negativ betroffen. Im Szenario mit Integration des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen ist sowohl die Wertschöpfung in Form von Löhnen als auch in Form von Gewinnen und Abschreibungen höher als im Baseline-Szenario. Es findet eine leichte Verschiebung hin zu Gewinnen und Abschreibungen statt. Bei einer anderen Ausgestaltung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen könnte dies jedoch anders aussehen. Generell bleibt festzuhalten, dass keines der MDCE-Szenarien starke Verschiebungen bewirkt.

Abbildung 4-88: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Gewinnen und Löhnen – absolut in Mrd. €



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 4-89: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Gewinnen und Löhnen –anteilig in %



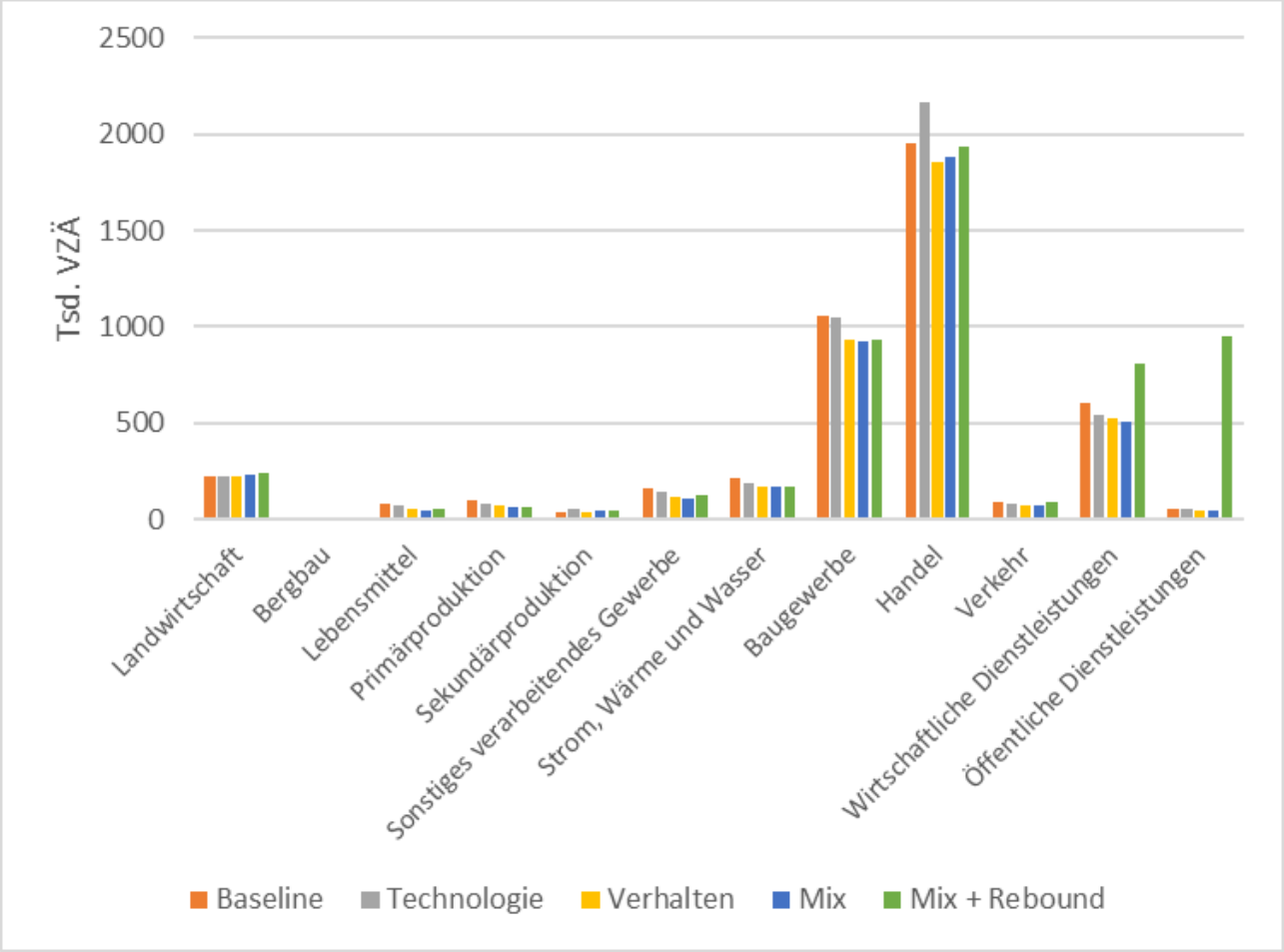
Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Arbeitskräftebedarf

Analog zu den oben ausführlich beschriebenen und interpretierten strukturellen Effekten der MDCE-Szenarien auf die Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen werden in diesem Abschnitt die strukturellen Effekte auf den Arbeitskräftebedarf nach Wirtschaftsbereichen dargestellt.

In Abbildung 4-90: ist der mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien direkt und indirekt verbundene Arbeitskräftebedarf nach Wirtschaftsbereichen dargestellt, in Abbildung 4-91 die relative Änderung im Vergleich zur Baseline. Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf hängen von der gleichen Größe, dem Produktionswert der unterschiedlichen Wirtschaftsbereiche, ab. Die Verlagerungen in der Produktion haben einen großen Anteil an den gezeigten strukturellen Effekten. Dies bedeutet, dass das grundsätzliche Bild hinsichtlich der strukturellen Effekte ähnlich ist, wie bei der Bruttowertschöpfung (vgl. Abbildung 4-86). Daher wird an dieser Stelle nicht mehr im Detail auf die einzelnen Wirtschaftsbereiche eingegangen, um Wiederholungen zum vorherigen Abschnitt zu vermeiden.

Abbildung 4-90: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Wirtschaftsbereichen – absolut in Mio. Vollzeitäquivalenten



Quelle: Eigene Darstellung. Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.

Es gilt jedoch zu beachten, dass auch die unterschiedlichen spezifischen Wertschöpfungsanteile bezogen auf den Produktionswert der Wirtschaftsbereiche bzw. die unterschiedlichen Beschäftigungsintensitäten zu den strukturellen Effekten beitragen. Die Verteilung auf Wirtschaftsbereiche wird sich daher für Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf etwas unterscheiden. An dieser

Stelle soll daher nur auf auffällige Abweichungen im Vergleich zur Bruttowertschöpfung eingegangen werden.

In Bezug auf den absoluten Arbeitskräftebedarf, der mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien verbunden ist, stechen Handel, gefolgt von Baugewerbe und wirtschaftliche Dienstleistungen hervor. Dies sind zwar auch die Bereiche, die am meisten Wertschöpfung verzeichnen, insgesamt ist dort das Bild jedoch ausgeglichen. Das liegt an der hohen Beschäftigungsintensität dieser Wirtschaftsbereiche.

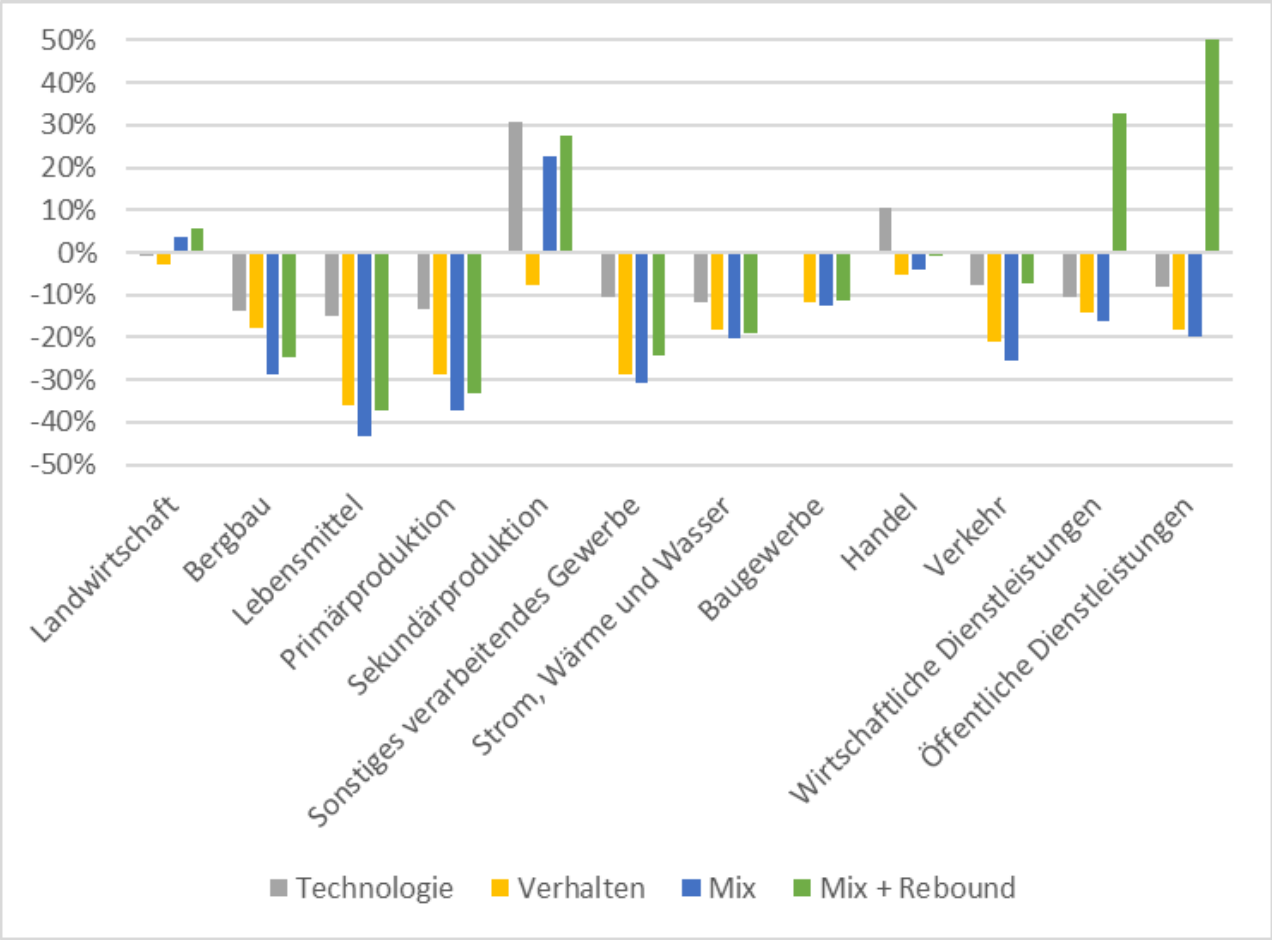
Mit Blick auf die Veränderungen gegenüber der Baseline fällt auf, dass der Anstieg im Arbeitskräftebedarf im Bereich der Produktion von Sekundärrohstoffen höher ausfällt als der Wertschöpfungsanstieg. Dies kann so interpretiert werden, dass innerhalb dieses Bereichs insbesondere Wirtschaftsbereiche mit einer vergleichsweise niedrigen Arbeitsproduktivität profitieren – ein Beispiel sind Flaschenrücknahmesysteme. Im Bereich der Primärproduktion fallen die Veränderungen des Arbeitskräftebedarfs hingegen ähnlich aus wie für die Wertschöpfung.

Die Produktion von Lebensmitteln ist aus relativer Sicht in Bezug auf den Arbeitskräftebedarf am stärksten negativ betroffen – in Bezug auf die Wertschöpfung war dies die Herstellung von Primärrohstoffen. Dies bedeutet, dass innerhalb des Lebensmittelsektors insbesondere Bereiche mit vergleichsweise niedriger Arbeitsproduktivität negativ betroffen sind, vor allem die Fleischproduktion.

Im Landwirtschaftssektor hingegen profitieren tendenziell die Bereiche mit einer vergleichsweise niedrigen Arbeitsproduktivität (Anbau von Obst und Gemüse), weshalb die relative Änderung des Arbeitskräftebedarfs im Vergleich zur Baseline für das Mix Szenario sogar positiv ausfällt, während die Wertschöpfungseffekte leicht negativ sind.

Auffällig ist auch der Handel. Hier fällt die relative Änderung des Arbeitskräftebedarfs deutlich weniger negativ aus als für die Wertschöpfung und es ergeben sich nur moderate Rückgänge in Mix- und Verhalten-Szenario. Insbesondere im Einzelhandel kommt es – trotz Wertschöpfungsverlusten – kaum zu einem Rückgang des Arbeitskräftebedarfs. Dies liegt daran, dass beispielsweise bei einem hohen Anteil an Online-Handel (z.B. im Bereich Kleidung) der Arbeitskräftebedarf im Handel selbst weniger stark sinkt als die Wertschöpfung. Hinzu kommt, dass der Handel teilweise auch positive Effekte verzeichnet, weil beispielsweise Maßnahmen im Verpackungssektor hier zusätzlichen Arbeitskräftebedarf bewirken oder auch aufgrund einer zusätzlichen Nachfrage im Bereich der Reparaturen. Im Technologie-Szenario können diese positiven Effekte die negativen Effekte durch nachfragereduzierende Maßnahmen, die hier weniger stark ausgeprägt sind, sogar überkompensieren und es kommt zu einem zusätzlichen Arbeitskräftebedarf.

Abbildung 4-91: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Wirtschaftsbereichen – Relative Änderung ggü. Baseline in %



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

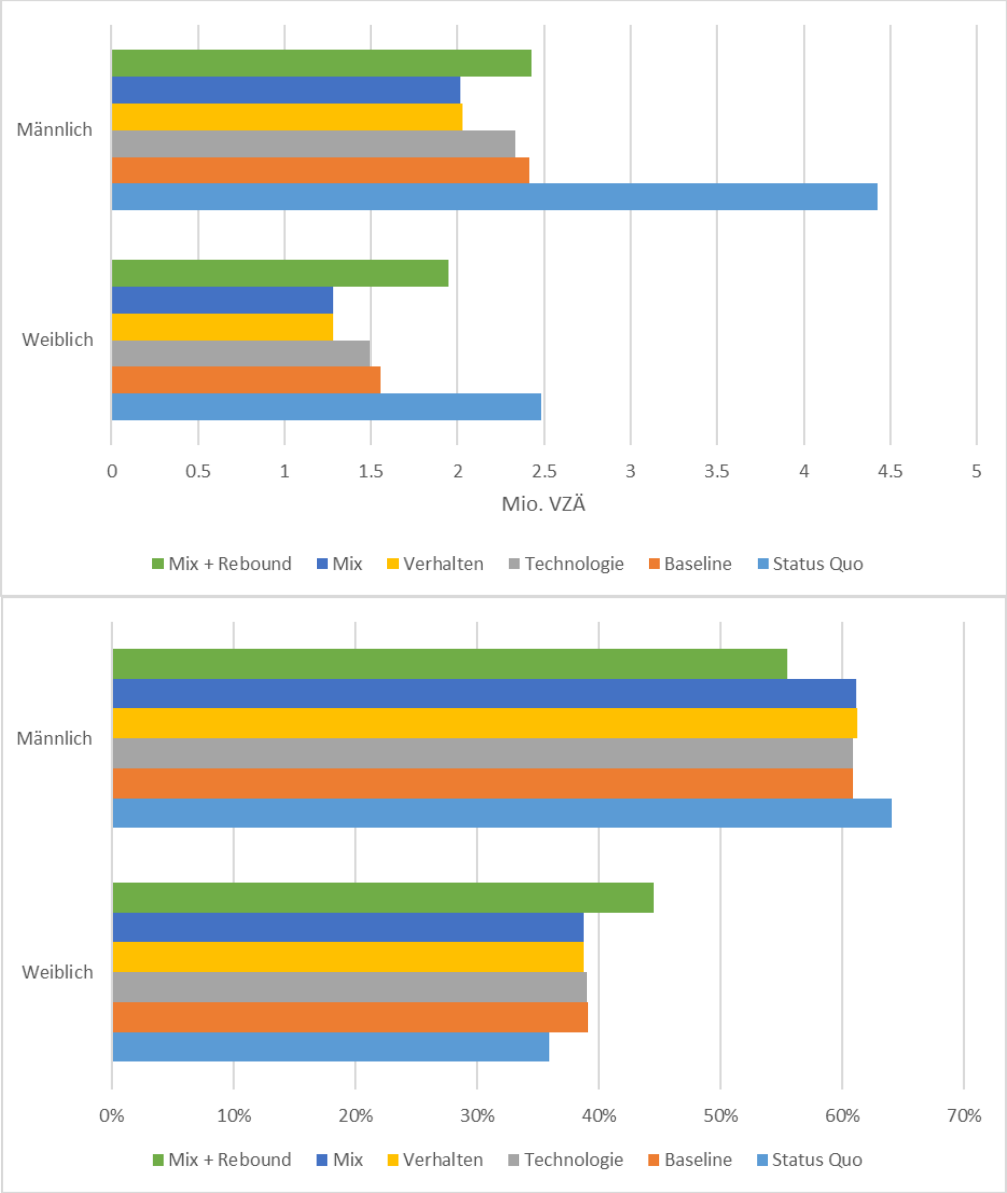
Der Arbeitskräftebedarf lässt sich nach weiteren Merkmalen spezifizieren. In Abbildung 4-92 ist der mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien verbundene Arbeitskräftebedarf nach Geschlecht dargestellt – absolut in Mio. VZÄ (linke Abbildung) und anteilig in % (rechte Abbildung). Hierbei muss beachtet werden, dass dafür jeweils die auf dem Jahr 2015 beruhenden Daten für die 163 in EXIOBASE abgebildeten Wirtschaftsbereiche genutzt wurden und keine grundsätzlichen Veränderungen mit Blick auf das Jahr 2045 berücksichtigt wurden. In der Abbildung 4-92 ersichtliche Verschiebungen ergeben sich somit aus strukturellen Verlagerungen zwischen den Wirtschaftsbereichen, die sich aufgrund der Nachfrageänderungen in den unterschiedlichen Szenarien ergeben. Dies gilt auch für den in Abbildung 4-93 dargestellten Arbeitskräftebedarf nach Qualifikationsniveaus.

Absolut gesehen geht der mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien verbundene Arbeitskräftebedarf sowohl für weibliche als auch männliche Arbeitskräfte zurück. Der größte Anteil dieses Rückgangs ist dabei auf den Anstieg der Arbeitsproduktivität zurückzuführen. Die strukturellen Änderungen bei den Wirtschaftsbereichen führen dazu, dass der Rückgang für männliche Arbeitskräfte etwas stärker ausfällt als für weibliche, wodurch der Anteil der weiblichen Arbeitskräfte etwas steigt. Wie in der übergeordneten Entwicklung geht der Arbeitskräftebedarf in den MDCE-Szenarien ohne Rebound im Vergleich zur Baseline zurück. Dieser Rückgang ist für die Szenarien Mix und Verhalten besonders stark ausgeprägt. Es kommt jedoch nicht zu deutlichen Verschiebungen bei den Anteilen.

Eine weitere Verschiebung hin zu mehr weiblichem Arbeitskräftebedarf zeigt sich bei Integration des Rebounds, bei dem das freiwerdende Einkommen zu mehr Nachfrage in den nicht in den CE-Maßnahmen regulierten Dienstleistungen führt.

Die Ergebnisse sollten nicht überinterpretiert werden, da davon auszugehen ist, dass sich bis zum Jahr 2045 die Geschlechteranteile bei der Berufswahl ändern werden. Generell ist es aufgrund des demographischen Wandels nötig, die Frauen zukünftig in noch größerem Umfang am Arbeitsmarkt zu beteiligen, wodurch ihr Anteil am Arbeitskräfteangebot steigen wird. In diesem Sinne gehen insbesondere die im Szenario Mix+Rebound dargestellten Verlagerungseffekte hin zu einem größeren Anteil weiblicher Arbeitskräfte in eine gewünschte Richtung.

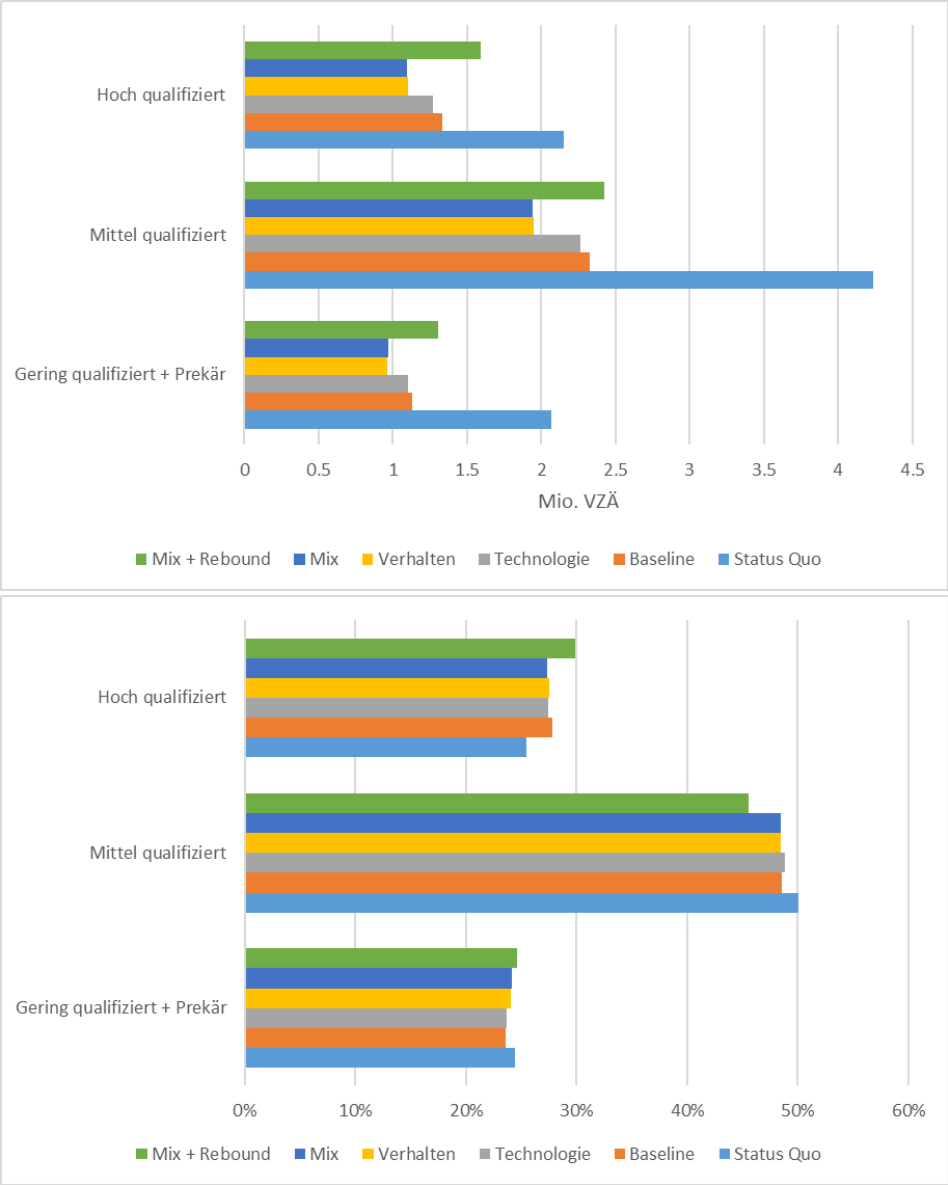
Abbildung 4-92: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Geschlecht – absolut in Mio. Vollzeitäquivalenten (obere Abbildung) und anteilig in % (untere Abbildung)



Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Hinsichtlich des Qualifikationsniveaus führen die Nachfrageänderungen in den MDCE-Szenarien vor allem zu einem Anstieg des Anteils hoch qualifizierter Arbeitskräfte im Vergleich zum Status quo, da diese vom Rückgang des Arbeitskräftebedarfs weniger stark betroffen sind (vgl. Abbildung 4-93).

Abbildung 4-93: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Qualifikationsniveau – absolut in Mio. Vollzeitäquivalenten (obere Abbildung) und anteilig in % (untere Abbildung)



Anmerkung: “Rebound” bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Darstellung.

Die MDCE-Szenarien ohne Rebound unterscheiden sich untereinander bzw. im Vergleich zur Baseline kaum bezüglich der Anteile der unterschiedlichen Qualifikationsniveaus. Ein deutlicher Unterschied ergibt sich hingegen bei Beachtung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen. In der hier betrachteten Ausprägung, wo freiwerdendes Einkommen zu mehr Nachfrage in den nicht durch CE-Maßnahmen regulierten Dienstleistungsbereichen führt, erfahren hoch qualifizierte und gering qualifizierte Arbeitskräfte einen deutlichen Zuwachs im Vergleich zur Baseline. Der Bedarf an mittel-

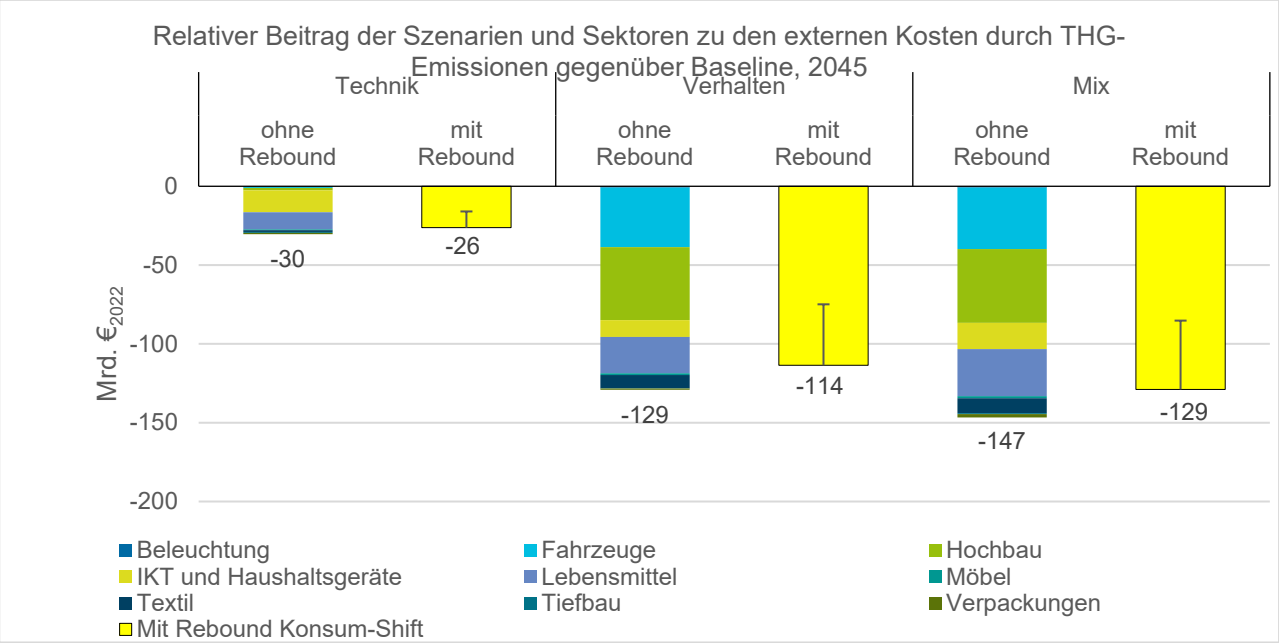
qualifizierten Arbeitskräften steigt absolut zwar auch leicht an, anteilig sinkt er jedoch. Die Qualifikationsniveaus hoch, mittel und gering entsprechen der International Standard Classification of Occupations der ILO.

4.4 Externe Kosten

4.4.1 THG-bedingte Umweltkosten der Szenarien

Die Verminderung direkter THG-Emissionen durch die Szenarien ohne Berücksichtigung von Rebound-Effekten bewegt sich im Bereich zwischen -30 Mrd. $€_{2020}$ (-5,3 %) im Technologie-Szenario und -147 Mrd. $€_{2020}$ (-25,9 %) im Mix-Szenario (Abbildung 4-94). Verhaltensänderung treiben damit sowohl die Einsparung von Treibhausgasen in Mt CO_2-Äq als auch deren Gegenwert in Euro in der Circular Economy. Über alles Szenarien hinweg entfällt das größte Potenzial auf die Sektoren Fahrzeuge, Hochbau und Lebensmittel.

Abbildung 4-94: Ergebnis Umweltkosten durch direkte THG-Emissionen ohne und mit Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen 2045



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Berechnung.

Dieser externe Nutzen tritt global auf durch eine Abmilderung der Folgen des Klimawandels auf. Zum Vergleich: die Kosten des Klimawandels allein für Deutschland werden von Flaute et al. (2022) auf 20 bis 70 Mrd. € im Jahr 2050 geschätzt. Global ermittelt Harmstone (2020) die Kosten klimawandelbedingter Naturkatastrophen auf 650 Mrd. USD im Zeitraum 2016 bis 2018. Zur Erreichung der Paris-Ziele schätzt die OECD (2018) auf 6,9 Billionen USD jährlich bis 2030, Die Abgrenzungen und Bewertungsansätze der Studien differieren. Die Beispiele legen jedoch nahe, dass die hier gewählten Szenarien zwar die globalen ökonomischen Konsequenzen des Klimawandels nur geringfügig abmildern können, jedoch auf dem Niveau der Folgekosten für Deutschland liegen könnten.

Das Rebound-Szenario, in dem das freiwerdende verfügbare Einkommen in nicht durch die CE-Maßnahmen regulierten Konsumbereichen verausgabt wird, hat hierauf nur einen begrenzten Einfluss. Die Umweltkosten durch direkte THG-Emissionen erhöhen sich dadurch um 4 Mrd. $€_{2022}$

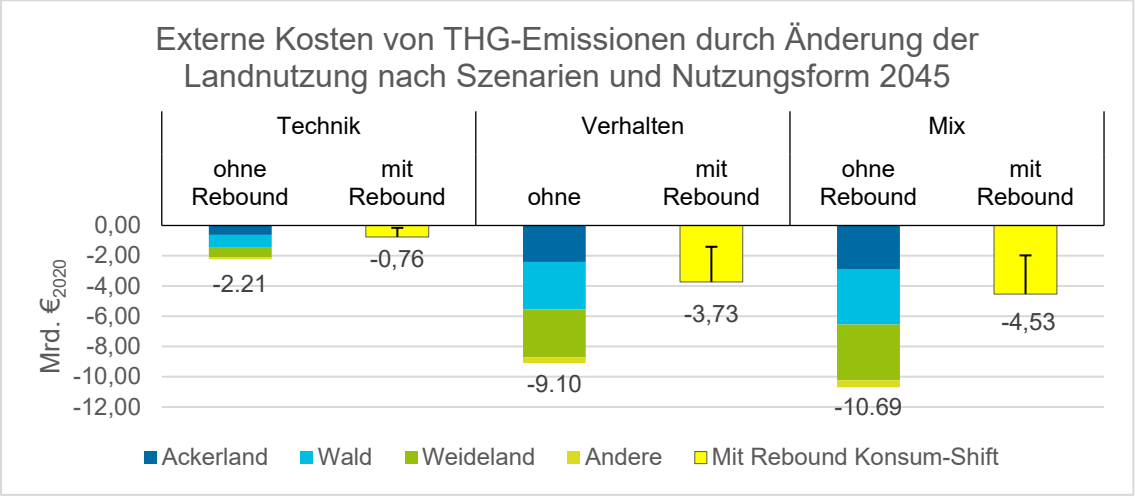
(Technologie) bis 18 Mrd. €$_{2022}$ (Mix). Die Einsparung von Umweltkosten fällt damit im Szenario Mix um 12 % geringer aus als ohne Berücksichtigung von Rebound-Effekten. Sehr viel deutlicher fällt die Minderung eingesparter Umweltkosten unter den Annahmen des Rebound-Szenarios Investitionen in Maschinen und Ausrüstungen aus. Hierin steigen im Szenario Mix die direkten THG-Emissionen um 14,5 Mrd. €$_{2022}$, womit sich der Einspareffekt der CE-Maßnahmen um 42 % auf 85,2 Mt abschwächt.

Mit den ermittelten Einsparungen der Landnutzung ohne den Sektor Lebensmittel zwischen einer Million Hektar im Technologie-Szenario und 4,8 Mio. ha im Mix-Szenario ergibt sich ein Potenzial zur Verminderung von Umweltkosten durch vermiedene THG-Emissionen zwischen 2,2 Mrd. €$_{2020}$ in Technologie-Szenario und 10,7 Mrd. €$_{2020}$ in Mix-Szenario. Der Sektor Lebensmittel wird für die Ermittlung der Umweltkosten durch Landnutzungsänderungen ausgeklammert, da dessen Wirkungen bereits in der Ökobilanzierung des Sektors Berücksichtigung findet (vgl. Abschnitt 4.1.1.1)

Auch ohne den Sektor Lebensmittel dominieren die für dessen Produktion notwendige Landnutzungsformen Acker- und Weideland die ermittelten eingesparten Umweltkosten. Diese und die Landnutzungsform (bewirtschafteter) Wald tragen hierzu jeweils rund ein Drittel bei. Der hohe Anteil landwirtschaftlicher Flächen ist mit deren wesentlich höherer negativer Klimabilanz im Vergleich zu Wald, welcher auch mit forstwirtschaftlicher Nutzung noch als CO_2-Senke fungieren kann, zu erklären.

Rebound-Effekte haben einen wesentlichen Einfluss auf die THG-Emissionen der Landnutzung. Unter den Annahmen des Rebound-Szenarios, in dem das freiwerdende verfügbare Einkommen in nicht durch die CE-Maßnahmen regulierten Konsumbereichen verausgabt wird, vermindern sich die Einsparungen der Umweltkosten um rund 60 % von 10,7 auf 4,5 Mrd. €$_{2022}$. Im Rebound-Szenario Investitionen in Maschinen und Ausrüstungen fällt dieser Effekt noch deutlicher aus. Hier vermindern sich die Einsparungen THG-bedingter Umweltkosten um 76 % auf 2,6 Mrd. €$_{2022}$ (Abbildung 4-95). Die große Minderung durch die Rebound-Effekte können zum Teil mit dem veränderten Konsumverhalten in den Bereichen Hotellerie und Gastronomie und dem damit verbundenen zusätzlichen Lebensmittelbedarf erklärt werden.

Abbildung 4-95: Monetäre Bewertung anthropogener THG-Emissionen durch veränderte Landnutzung ohne Lebensmittel – Potenzial 2045 ohne und mit Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen



Anmerkung: "Rebound" bezieht sich auf den Rebound durch freiwerdendes Einkommen.
Quelle: Eigene Berechnung.

Mit Einbezug des Sektors Lebensmittel würden sich die Einsparungen von THG-Emissionen durch veränderte Landnutzung grob verdoppeln, diese wurden aus oben genannten Gründen zur Vermeidung von Doppelzählungen hier jedoch ausgeklammert.

An den vermiedenen THG-bedingten Umweltkosten hat der Bereich Landnutzungsänderung einen Anteil von rund 6,6 % ohne Lebensmittel und Rebound-Effekte (Abbildung 4-22). Zum Vergleich: das globale THG-Emissionsinventar nach IPCC (2022) schätzt den Anteil des Sektors Agriculture, Forestry and other Land Use (AFOLU) am globalen THG-Ausstoß mit 23 %.

Tabelle 4-23: Vergleich der monetarisierten THG-Emissionen aus direkter Emission und veränderter Landnutzung ohne Lebensmittel und Rebound-Effekte

Sektor	Technologie	Verhalten	Mix
Direkte THG-Emissionen (Mrd. €$_{2022}$)	-30,4	-129,1	-146,7
THG Landnutzung (Mrd. €$_{2022}$)	-2,2	-9,1	-10,7
Gesamte THG-Emissionen (Mrd. €$_{2022}$)	-32,6	-138,2	-157,4
Anteil Landnutzung	6,7 %	6,6 %	6,8 %

Quelle: eigene Berechnung

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um ein Potenzial und nicht um eine wahrscheinliche Reduktion THG-bedingter externer Kosten handelt. Zum einen muss zum Heben dieses Potenzials das freiwerdende Acker-, Weide- und Forstland renaturiert werden, zum anderen braucht die Entwicklung der renaturierten Flächen gerade bei Acker- und Weideland zu einer THG-Senke Zeit. Andererseits wurde mit der Bewertung THG-bedingter externer Kosten lediglich einen Teil der Ökosystemdienstleistung von Naturräumen bewertet. Deren Beitrag zu Artenvielfalt, Arbeitsplätzen und Nahrungsmittelsicherheit können nach aktuellen Forschungsstand nicht ausreichend genau beziffert werden.

Ein direkter Vergleich der vermiedenen THG-bedingten externen Kosten mit den im Kapitel 4.3 ermittelten Wertschöpfungseffekten ist nur bedingt sinnvoll. Zum einen, weil die THG-bedingten externen Kosten nur einen Teil der externen Kosten ausmachen, zum anderen, weil sich die mit der Nachfrage in den MDCE-Szenarien verbundenen Wertschöpfungseffekte nur auf Deutschland beziehen, die THG hingegen (sinnvollerweise) global ermittelt werden. Für einen fairen Vergleich müssten auch Wertschöpfungseffekte in anderen Regionen hinzugenommen werden.

4.4.2 Einordnung Umweltkosten

Die hier ermittelten THG-bedingten Umweltkosten durch direkte Emissionen und durch Landnutzungsänderungen basieren auf grundlegenden Prämissen. Diese werden im Folgenden diskutiert und in den aktuellen Diskurs eingeordnet.

Kostensätze für THG-Emissionen

Entsprechend der Ausführungen im Kapitel 3.5.7, leitet sich der Kostensatz je direkt oder indirekt über Landnutzungsänderungen emittierter Tonne THG aus der oberen Schätzung des UBA (2020b) mit einer sozialen Diskontrate von 0 % ab. Folgt man der Argumentation der ungewichteten Gewichtung zukünftiger Schäden im Sinne einer vollständigen Generationengerechtigkeit nicht, ließe sich im Rahmen der Kosten-Nutzen-Analyse auch mit dem wesentlich niedrigeren Kostensatz von 254 €$_{2020}$ (241 €$_{2020}$ +5 % Preissteigerung) nach Tabelle 3-6 argumentieren. Die gesamten Nutzen

aus direkten THG-Emissionen und Landnutzung ohne Rebound-Effekte würden dann entsprechend um 68 % auf eine Einsparung von 51 Mt CO_2-Äq. vermindern.

Kosten des Klimawandels

Für die Umweltkosten des Klimawandels gibt es schon seit einigen Jahren Literatur / Studien: "Umweltkosten sind ökonomisch höchst relevant. Das zeigte bereits der sogenannte „Stern Report“ im Jahr 2006, der die allein durch den Klimawandel entstehenden Kosten auf jährlich bis zu 20 % des globalen Bruttoinlandsprodukts bezifferte," (vgl. Umweltbundesamt (2021). Unterschiedliche Techniken zur Kosten- und Risikobewertung verdeutlichten darin den hohen ökonomischen Nutzen eines kurzfristigen und entschlossenen Handelns gegenüber den Folgekosten des Klimawandels (Stern 2006). Diese und weitere Analysen bilden die Grundlage für die Schätzung von Schadenskosten in der Methodenkonvention 3.0 des UBA. Unter anderem lassen sich folgende Studien herausgreifen:

- Sovacool et al. (2021) präsentieren eine Meta-Analyse von ~140 Studien, die insg. ~700 Schätzungen von sozialen Kosten beinhalten. Sie beziffern den Mittelwert der Kosten der durch die Energiewirtschaft[33] bis zum Jahr 2040 verursachten externen Effekte auf 11,64 Billionen USD und der durch den Transportsektor verursachten externen Effekte bis 2040 auf 13,02 Billionen USD, und zwar nur für die Europäische Union, die USA, China und Indien. Zusammengenommen, stellen die 24,66 Billionen USD für externe Effekte der Energiewirtschaft und des Transports ~29 % des globalen BIP dar. Die maximale Schätzung der sozialen Kosten durch beide Sektoren beläuft sich auf 169,43 Billionen USD. Mit anderen Worten: Bis 2040 könnte die Energieerzeugung und der Transportsektor annähernd das gesamte weltweite BIP an zusätzlichen Kosten verursachen. Diese Kosten werden von Energieerzeugern und Verbrauchern teilweise schon getragen (z.B. Emissionshandel, Energiesteuer usw.), aber sie decken längst nicht alle Kosten ab. Daher werden weitere Kosten von der Gesellschaft als Ganzes (externe Kosten) getragen.
- Dieser Befund wird durch den sechsten Assessment-Report des IPCC (2023) gestützt. Dieser argumentiert, dass die ökonomischen Folgekosten des Klimawandels in der Größenordnung des globalen Bruttoinlandsprodukts liegen können. Die tatsächlichen sozialen Kosten hängen jedoch in starkem Maße vom Emissionspfad, und damit von Minderungsmaßnahmen, sowie von Anpassungsstrategien ab.
- Nach (UBA 2020a) können, auf Grundlage von Fallstudien, alleine durch den Klimawandel häufigere und heftigere Starkregenereignisse in Deutschland Schäden an Wohngebäuden von mehr als 13 Mrd. € verursachen. Ohne Verminderung der Bebauung von Freiflächen könnten diese Kosten bis 2030 um weitere 5,8 % steigen.
- Laut OECD (2012) wird der Klimawandel auf globaler Ebene bis 2050 durch Überschwemmungen mehr als 1,6 Milliarden Menschen (oder fast 20 % der Weltbevölkerung) und Wirtschaftsgüter im Wert von etwa 45 Billionen USD (340 % mehr als 2010) gefährden. Dies sind 340 % mehr als in 2010 (OECD 2012).

Die Auswahl an Literaturstellen verdeutlicht, dass sich viele Schätzungen der Folgekosten des anthropogenen Klimawandels auf die relativ leicht bezifferbare Kategorie Starkregen und Überschwemmungen konzentriert. Ernteausfälle und Hunger durch die Ausbreitung von Wüsten, Versteppung, Dürren und Hitzeperioden sind demgegenüber schwerer erfassbar, da diese in manchen Weltregio-

[33] Kohle, Erdöl, Erdgas, Kernenergie, erneuerbare Energien

nen durch die Verschiebung von Klimazonen auch zurückgehen können. Weitere Folgen wie Konflikte um Wasser und dadurch ausgelöste Vertreibung und Migration sind schließlich von der Reaktion lokaler Kräfte und der Weltgemeinschaft insgesamt abhängig.

Im Sinne des ökonomischen Prinzips der Vorsicht und der Dringlichkeit kurzfristigen Handelns sollten deshalb hohe Folgekosten des Nichthandelns als Leitlinie für politische Entscheidungen herangezogen werden. Dies unterstreicht die Wahl der hohen Kostenschätzung ohne Diskontierung zukünftiger Schäden nach der Methodenkonvention des UBA.

Eine weitere Gruppe von Studien beziffert die ökonomischen Kosten und Nutzen von Klimaschutzmaßnahmen. Das Breisig et al. (2022) untersucht beispielsweise den Break-Even von Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr bezogen auf einen CO_2-Preis von 200 €/t CO_2-Äq. Die Studienreihe Klimapfade im Auftrag des Bundesverbands der deutschen Industrie (BDI) bestimmt seit 2009 über alle Industriesektoren Vermeidungskostenkurven verschiedener Technologien. Hierbei werden Grenzkosten von Technologien zur Vermeidung der "letzten Tonne" von 600 €/t CO_2-Äq. und mehr ermittelt. Diese würden für steile THG-Reduktionspfade schließlich auch benötigt (BCG 2021; McKinsey & Company 2020; BCG und Prognos 2019; 2018; McKinsey & Company 2009).

Kosten für Verlust an Biodiversität

In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass die Kosten für den Verlust von Ökosystemen und biologischer Vielfalt auf der Grundlage des Verlusts der von ihnen erbrachten Ökosystemleistungen berechnet werden kann (Braat und Brink 2008; Markandya 2015; NABU; BCG 2020; Drenckhahn et al. 2020).

Der Verlust der biologischen Vielfalt ist auch mit Kosten, die hauptsächlich mit dem Verlust funktionierender Ökosysteme zusammenhängen, verbunden, wenn keine Maßnahmen für einen vernünftigen Umgang mit Chemikalien (in diesem Fall Pestiziden) ergriffen werden. Einem Bericht von NABU und BCG (2020) zufolge führt die vom Menschen verursachte Beeinträchtigung der Funktionsweise von Ökosystemen weltweit zu jährlichen Verlusten von Ökosystemleistungen, die sich auf 6 bis 30 Billionen Dollar beziffern lassen. Was die Methodik dieser Studie betrifft, so wurde der Wert der Ökosystemleistungen (definiert als der relative Beitrag der Naturgüter zu einem bestimmten Zeitpunkt) auf der Grundlage der Ecosystem Service Value Database geschätzt, die zwischen 2007 und 2014 für die internationale TEEB-Initiative (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) erstellt wurde.

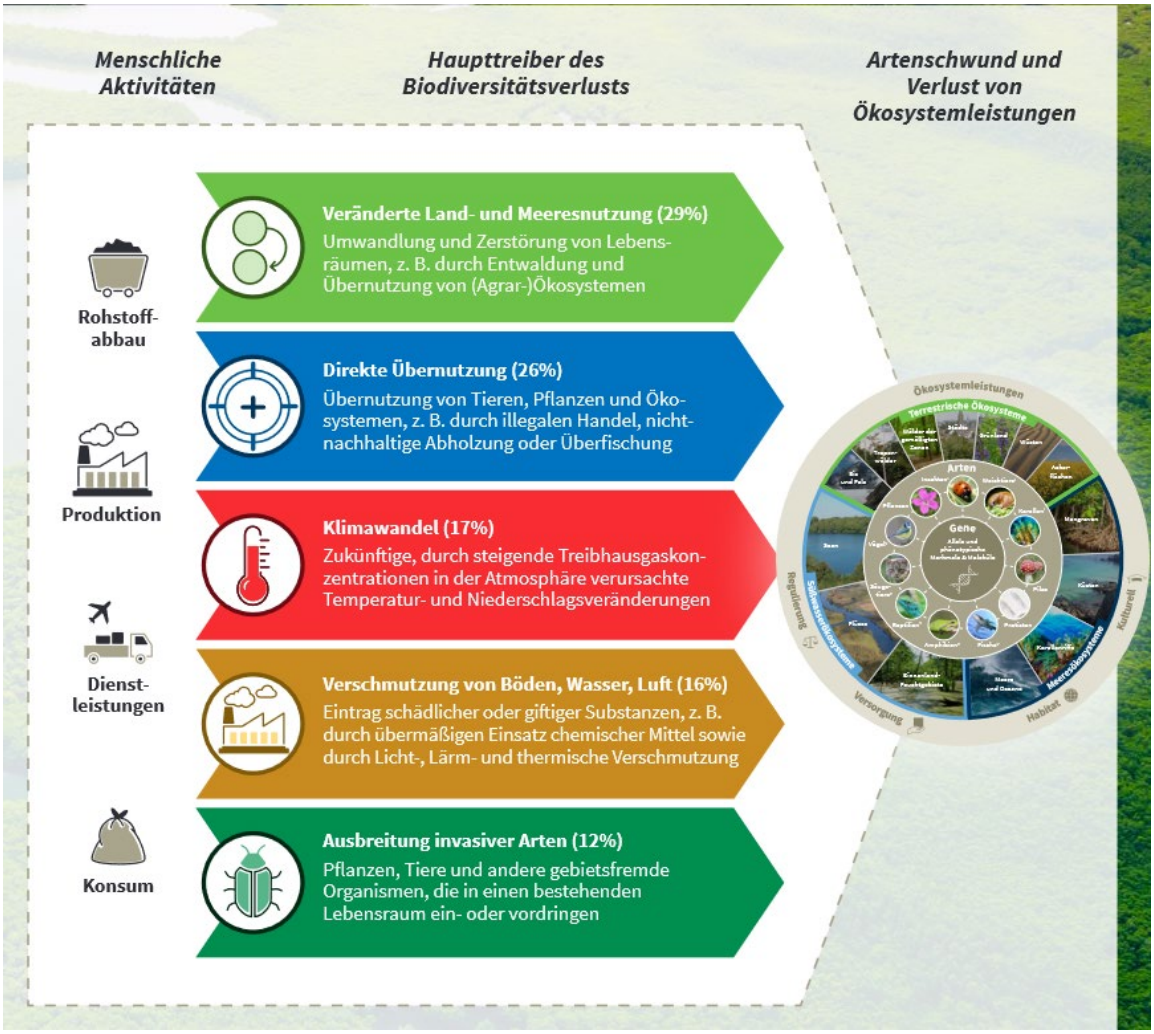
Gegenwärtig verlieren wir jedes Jahr biologische Vielfalt, die in jedem Folgejahr Ökosystemleistungen im Wert von rund 50 Mrd. € erbracht hätte. Die kumulierten Verluste werden bis 2050 etwa 7 % des weltweiten Verbrauchs ausmachen. Diese Werte beziehen sich nur auf landbasierte Ökosystemveränderungen, und nicht einmal auf alle. Als solche sind sie eine Unterschätzung (Braat et al., 2008).

Es gibt globale Verluste, wie z. B. den Verlust von Vegetation für Kohlenstoffspeicherung, was sich auf die Klimaselbstregulierung auswirkt, sowie Verluste, die die lokale Bevölkerung zu spüren bekommt, z. B. bei Wasserversorgung und Luftverschmutzung. Die größten Verluste sind in den tropischen Waldbiomen zu verzeichnen (Braat et al., 2008). Braat et al. kamen zu diesen Monetarisierungen mittels einer Bewertungsdatenbank, einer Zusammenstellung von Studien, die sich mit der Frage der wirtschaftlichen Bewertung befassen.

Was die Schäden an der Landwirtschaft anbelangt, so gehen die OECD-Prognosen (2016) davon aus, dass die landwirtschaftliche Produktion in den USA bis 2060 aufgrund der Luftverschmutzung

um 4,9 % zurückgehen wird - dies sind die größten Auswirkungen auf die Landwirtschaft in der gesamten OECD. Was die Schäden an der Landwirtschaft anbelangt, so gehen die OECD-Prognosen (2016) davon aus, mit Anwendung eines allgemeinen Gleichgewichtsmodells („CGE“) berechnet, dass die landwirtschaftliche Produktion in den USA bis 2060 aufgrund der Luftverschmutzung um 4,9 % zurückgehen wird - dies sind die größten Auswirkungen auf die Landwirtschaft in der gesamten OECD.

Abbildung 4-96: Treiber des Biodiversitätsverlusts



Quelle: (NABU; BCG 2020)

Kosten für Ressourcennutzung

Eine dem Stern-Report ähnliche umfassende Untersuchung der Kosten für fehlenden Ressourcenschutz gibt es nicht. Aber: Wenn existierende Studien die mit dem Klimawandel, dem Biodiversitätsverlust oder anderen Umweltproblemen assoziierten Kosten berechnen, beziehen sich diese Zahlen zwar nicht nur auf die Kosten, die der Ressourcenverbrauch verursacht, aber sie beinhalten diese.[34]

[34] Weitere Anteile der in existierenden Studien dargestellten Umweltkosten sind auf andere menschliche Aktivitäten, z.B. Mobilität, zurückzuführen.

Zum Beispiel erfordert Ressourcennutzung Energie und Transport, die vorherrschende kohlenstoffintensive Energieerzeugung mit fossilen Brennstoffen hat Auswirkungen auf die Luftqualität, Klimawandel, Unfälle und Krankheit, Entwaldung für Straßenbau, Wasserverknappung, Biodiversitätsverlust usw. Letztendlich führen Luftverschmutzung, Wasserverknappung und Co. zu Auswirkungen auf die Gesundheit und die Ernte. Dieser Zusammenhang liefert die Begründung für mit erneuerbaren Energien betriebener Verkehr und Veränderungen im Mobilitätsverhalten (so wie im Sektor „Fahrzeuge und Batterien" modelliert, z.B. weniger motorisierter Individualverkehr, mehr öffentlicher Nahverkehr, Radwege, Sharing usw.).

Der Anbau von Futtermitteln für die Viehzucht (in Monokulturen) und der Anbau von Baumwolle für Kleidung (in Monokulturen) führen zu Veränderungen in der Landnutzung und -bewirtschaftung, die zum Verlust von Ökosystemen und der biologischen Vielfalt führen, was wiederum den Verlust von Ökosystemleistungen zur Folge hat. Dies Kosten liefern zum Beispiel die Begründung für die Verringerung des Fleischkonsums, für die Verringerung der Verwendung von Textilien und weitere in den CE-Maßnahmen angenommene Reduktionen des Verbrauchs.

Weiterer Verlust von Ökosystemdienstleistungen und die Kosten dafür entstehen durch Baumwolleinsatz, der den Einsatz von Pestiziden erfordert, was zum Verlust der biologischen Vielfalt (z. B. bestimmter Insekten) beiträgt. Die entsprechenden Kosten können durch die Verringerung des Textilverbrauchs (CE-Maßnahmen 1 & 2 im Textilsektor) vermieden werden.

Die Verwendung von Stahl und Zement im Bauwesen erfordert die Herstellung riesiger Mengen dieser Materialien, die energieintensiv sind und folglich große CO_2-Emissionen verursachen, die zur globalen Erwärmung führen. Dies bietet Gründe für recycelten Beton, die Wiederverwendung von Baustahl und die Reduzierung von Stahl und Beton durch konstruktive Änderungen an Gebäuden. Der Lithiumabbau erfordert einen hohen Wasserverbrauch, was wiederum zu einer Verknappung des (Grund-)Wassers führt und eine Begründung für die Entwicklung langlebiger Fahrzeugbatterien liefert.

Es gibt zwar keine Studie, die direkt die externen Kosten in den hier genannten Zusammenhängen beziffern, aber wie erwähnt enthalten die genannten Studien, die sich auf Kosten durch Klimawandel usw. beziehen, die Ressourcenverbrauchsdimension.

Weitere Kosten

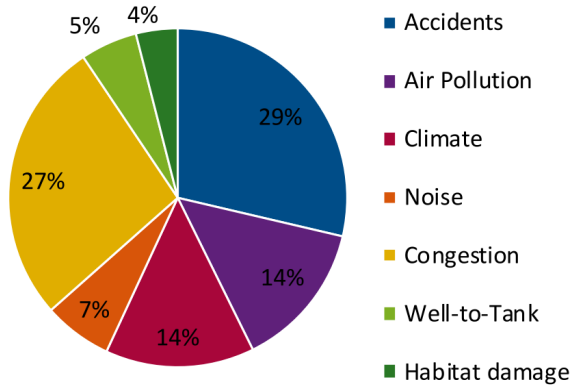
Bis 2060 werden die jährlichen Wohlfahrtskosten aufgrund vorzeitiger Sterblichkeit weltweit von 3 Billionen USD im Jahr 2015 auf 18-25 Billionen USD ansteigen, berechnet anhand von Schätzungen der individuellen Zahlungsbereitschaft zur Verringerung des Risikos eines vorzeitigen Todes. Der Gesamtschaden durch Schmerzen und Leiden aufgrund von Krankheiten durch Luftverschmutzung wird von 300 Mrd. USD im Jahr 2015 auf schätzungsweise 2,2 Billionen USD ansteigen, die Zahl der jährlich verlorenen Arbeitstage wird voraussichtlich 3,7 Mrd. erreichen, und die Kosten für das Gesundheitssystem werden sich auf 176 Mrd. USD belaufen, und dies alles bis 2060. Eine geringere Arbeitsproduktivität aufgrund von Luftverschmutzung wird voraussichtlich zu einem globalen BIP-Verlust von 0,4 % führen. (OECD 2016)

Neben Klimaemissionen, Landnutzungseffekten (wie Habitatverluste) und Luftverschmutzung umfassen weitere externe Effekte von Industrie und Verkehr die Bereiche Lärmemissionen, Unfälle, Zeitverluste durch Verkehrsstaus: Für den Sektor Verkehr in Europa werden diese durch das EU-Handbuch Externe Kosten des Verkehrs zusammengestellt (vgl. Abbildung 4-97, CE Delft 2020). THG-Emissionen setzen sich dabei aus den direkten Emissionen (Kategorie Climate) und den Well-to-Tank-Emissionen zusammen. Diese werden mit einem Kostensatz von lediglich 100 €/t CO_2-Äq.

bewertet, bewegen sich aber dennoch in einer ähnlichen Größenordnung wie die Kategorie Luftverschmutzung. Mit dem in dieser Studie gewählten Kostensatz von 790 €/t CO_2-Äq. würden die Klimafolgekosten inklusive Well-to-Tank alle übrigen Kostgenkategorien dominieren.

Habitatverluste spielen nach der Bewertung des EU-Handbuchs keine bedeutende Rolle. Diese werden lediglich über die Effekte Zerschneidung von Lebensräumen durch Infrastrukturen und Flächenversiegelung berechnet. Änderungen der Landnutzung durch menschliche Aktivitäten werden hier nicht berücksichtigt.

Abbildung 4-97: Externe Kosten des Verkehrs in Europa



Including data for aviation and maritime: rough estimations for EU28.

Quelle: CE Delft (2020)

Der vernünftige **Umgang mit Chemikalien**, einschließlich gefährlicher Abfälle, zielt darauf ab, die mögliche Exposition von Menschen und Umwelt gegenüber giftigen und gefährlichen Chemikalien zu verhindern, zu verringern oder zu minimieren. Wenn ein wissensbasiertes, präventives Risikomanagement von Chemikalien fehlt, führt das zu erheblichen Risiken für die menschliche Gesundheit und die Ökosysteme sowie zu entsprechenden wirtschaftlichen Kosten für Einzelpersonen, Unternehmen und die Gesellschaft insgesamt. Beispielsweise wurde im Jahr 2013 geschätzt, dass die Gesundheitskosten in den afrikanischen Ländern der Subsahara bis 2020 auf ca. 97 Mrd. USD ansteigen, davon ausgehend, dass Pestiziden auf nationaler und lokaler Ebene unzureichend gehandhabt werden (UNEP 2013). Bei der in dieser Studie angewandten Methode wurden die jüngsten Daten über die Gesundheitskosten von Verletzungen durch Pestizidvergiftungen in bestimmten afrikanischen Ländern südlich der Sahara auf die Region südlich der Sahara extrapoliert, um die jährlichen Gesamtgesundheitskosten für ein Basisjahr 2005 zu schätzen. Diese Analyse wurde dann durch eine Analyse zukünftiger Risikoszenarien auf das Jahr 2020 projiziert.

5 Diskussion

Die MDCE-Modellierungsstudie deckt ein großes Spektrum an Sektoren, Maßnahmen, Umweltwirkungen, sozioökonomischen Indikatoren und Querschnittsthemen ab, die für eine Circular Economy relevant sind. Damit ist sie die **erste, umfassende Studie im Bereich Circular Economy in Deutschland**. Der Schwerpunkt der MDCE-Studie liegt auf der inländischen Nachfrage mit einem Schwerpunkt auf den privaten Konsum, wohingegen Potenziale der Circular Economy in der Produktion von Gütern für den Export nicht mitberücksichtigt sind. Es handelt sich um neun Sektoren, deren Gütergruppen in Produktion und Nutzung mit hohen Umweltbelastungen verbunden sind und die entsprechend hohe Potenziale für Nutzen aus CE-Maßnahmen bieten[35].

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Studie kontextualisiert werden, auch mit Blick auf die Abwägung der Kosten und Nutzen für die Umsetzung der betrachteten CE-Maßnahmen in den neun betrachteten Sektoren. Das Maßnahmenspektrum deckt alle zehn R-Strategien ab. Es enthält somit auch eine Reihe von Vermeidungsmaßnahmen, womit ein ganzheitlicher Blick auf Circular Economy ermöglicht wird. Die Vermeidungsmaßnahmen sind wesentliche Treiber für die Erreichung des Ziels „Ressourcenflüsse verlangsamen“ – eine zentrale Handlungsstrategie auf dem Weg zu einer Circular Economy. Die Kosten und Nutzen im Rahmen der MDCE-Studie sollen daher im Kontext der Auswahl von CE-Maßnahmen interpretiert werden.

Die MDCE-Modellierungsstudie zeigt, dass der Übergang zu einer Circular Economy mit substanziell positiven Wirkungen verbunden ist. Auch verringert sich die Abhängigkeit der Volkswirtschaft von kritischen Ressourcen nachhaltig. Wie bei jeder großen Transformation sind aber auch Zielkonflikte inhärent, wenn auch nur kurzfristige. Die Sichtbarmachung von gesellschaftlichen Zielkonflikten ist ein wertvoller, wissenschaftlicher Beitrag der MDCE-Modellierungsstudie. Denn ein frühzeitiger und offener Umgang mit den Zielkonflikten, beispielsweise durch die sozialpolitische Flankierung von Maßnahmen oder Adressierung der unkalkulierbaren Rebound-Effekte, ist ausschlaggebend für die erfolgreiche Gestaltung und Akzeptanz einer Umweltpolitik mit Circular Economy.

Konsumbezogene Treibhausgasemissionen

Im Vergleich zum Status quo kommt es bereits im Baseline-Szenario im Jahr 2045 zu einem erheblichen Rückgang der durch den Konsum in den betrachteten Sektoren verursachten THG-Emissionen von 153 Mt CO_2-Äq (18 %). Dies ist auf eine Trendfortsetzung in den Sektoren Hochbau (Rückläufiger Bau neuer Gebäude auf Grund des demographischen Wandels), Fahrzeuge (Reduktion Individualverkehr, Elektrifizierung), Beleuchtung (Energieeffizienzmaßnahmen) und Lebensmittel (pflanzenbasierte Ernährung) zurückzuführen. **Bei der Umsetzung des ambitionierten MDCE-Szenarios (Mix-Szenarios) führen v.a. der veränderte Konsum und die verringerte Produktion in den analysierten Nachfragebereichen, im Vergleich zum Baseline zu weiteren 186 Mt CO_2-Äq (26 %) Einsparungen im Jahr 2045**. Die Einsparungen entsprechen knapp 25 % der im Jahr 2021 in Deutschland emittierten Treibhausgasemissionen. Allein die drei Sektoren Hochbau, Fahrzeuge & Batterien und Lebensmittel & Ernährung machen ca. 79 % der Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen aus. Weitere 18 % Treibhausgasemissionen lassen sich in den Sektoren Informations- und Kommunikationstechnologien/Haushaltsgeräte (IKT/HH-Geräte) und Textilien einsparen. Mit nur fünf Maßnahmenbündeln lassen sich fast 84 % der Treibhausgasemissionseinsparungen realisieren. Diese Maßnahmenbündel beziehen sich auf die genannten Vermeidungsmaßnah-

[35] Siehe MDCE-Machbarkeitsstudie Prakash et al. (2022)]

men und sind über viele Sektoren verteilt: Reduktion Wohn- und Bürofläche, Reduktion Individualverkehr, Planetary Health Diet, d.h. eine stärker pflanzenbasierte Ernährung, Ressourceneffiziente Rechenzentren und Reduktion Textilkonsum.

An dieser Stelle lohnt es sich, die THG-Einsparungen im Vergleich zum Status quo zu setzen. Denn im Baseline-Szenario wird davon ausgegangen, dass die in der Bundesregierung beschlossenen Umweltschutzmaßnahmen in den ausgewählten Sektoren bis 2045 umgesetzt sein werden. Vor dem Hintergrund großer Unsicherheiten im politischen Diskurs, z.B., wenn Prioritäten bei der Umsetzung von Maßnahmen neu definiert werden, könnte der hier gezeigte Entlastungseffekt von CE-Maßnahmen im Baseline-Szenario in geringerem Umfang auftreten als angenommen. **Im Vergleich zum Status quo würden die THG-Emissionen im Mix-Szenario im Jahr 2045 um 339 Mt CO_2-Äq (oder 39 %) niedriger liegen**. Das macht knapp 45 % der im Jahr 2021 in Deutschland emittierten Treibhausgasemissionen aus.

Berücksichtigt man den Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen, so verringern sich die Einsparungen, je nach Ausprägung des Rebounds auf 108-163 Mt CO_2-Äq im Mix-Szenario im Vergleich zum Baseline. Die Höhe des Rebounds hängt davon ab, ob das freiwerdende Einkommen auf Konsum in nicht durch die Maßnahmen regulierte Dienstleistungsbereiche verlagert wird, in zusätzlichen Staatsausgaben mündet oder in zusätzlichen Investitionen. Er fällt am höchsten bei zusätzlichen Investitionen aus und reduziert entsprechend den THG-Minderungseffekt von CE-Maßnahmen am meisten. Im Vergleich zum Status quo führen die im Rahmen der Studie modellierten CE-Maßnahmen unter Berücksichtigung von Rebound-Effekten durch freiwerdendes Einkommen in Summe zu einem Rückgang von 261-317 Mt CO_2-Äq, was immer noch eine Einsparung zwischen 30 % und 36 % bedeutet.

Industrietransformation

Die MDCE-Maßnahmen leisten auch einen großen Beitrag bei der Verringerung der Treibhausgasemissionen sowie des Endenergiebedarfs in der Industrie in Deutschland. Auf die Industrie entfällt heute etwa rund ein Viertel des Endenergiebedarfs in Deutschland, was vor allem auf energieintensive Schlüsselindustrien und Prozesse wie die Stahl-, Zement- und Ethylen-Produktion zurückzuführen ist. Die Dekarbonisierung dieser Industrien ist daher entscheidend für die Erreichung der europäischen und deutschen Klimaziele. Bereits im Baseline-Szenario kommt es bis 2045 durch die Umsetzung des beschlossenen Instrumentenmix in Deutschland zu einer substanziellen Emissionsreduktion von rund 48 % (-89 Mt CO_2-Äq) gegenüber dem Status quo, dies entspricht einer Emissionsminderung von 65 % gegenüber 1990. Als ambitioniertestes MDCE-Szenario kann das Mix-Szenario weitere **Emissionseinsparung von rund 10 % ggü. 1990 oder 26 Mt CO_2-Äq gegenüber der Baseline im Jahr 2045** beitragen. Hervorzuheben ist hier der Beitrag der CE-Maßnahmen bei der Reduktion von schwer vermeidbaren Emissionen, d.h. Prozessemissionen, welche durch chemische Reaktionen im Produktionsprozess entstehen.

Durch die Wirkung der MDCE-Maßnahmen wird die Endenergienachfrage in 2045 im Mix-Szenario um bis zu 112 TWh oder 17 % gegenüber der Baseline gesenkt. Dieser Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass Maßnahmen zur Energieeffizienz sowie die Umsetzung einer Circular Economy den Wachstumsimpuls der Industriewertschöpfung überkompensieren. Hinzu kommen zusätzliche Effekte, wie etwa Effizienzgewinne durch die Elektrifizierung von Prozessen oder die Verschiebung der Wasserstoffproduktion in den Umwandlungssektor.

Bei einer Dekarbonisierung ändert sich allerdings der Energiemix im Jahr 2045. Dabei sind Strom gefolgt von Wasserstoff die dominanten Energieträger. Bei der Dekarbonisierung der deutschen Industrie kann durch die MDCE-Maßnahmen ein klarer Rückgang des Endenergieverbrauchs von 104

TWh (-17 %) im Jahr 2045 erreicht werden. Daraus lässt sich schließen, dass eine Circular Economy einen relevanten Beitrag zum Ziel einer CO_2-neutralen und wettbewerbsfähigen Wirtschaft leisten kann, denn ein niedrigerer Verbrauch an sekundären Energieträgern (z.B. Strom und Wasserstoff) kann kurzfristig Knappheiten entschärfen und langfristig die Kosten für den Ausbau erneuerbarer Energien, den Netzausbau und den Import von Sekundärenergieträgern senken.

Ressourceninanspruchnahme

Für die Ressourceninanspruchnahme zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei konsumbezogenen Treibhausgasemissionen. Auf Grund bereits beschlossener oder fortgeschrittener Maßnahmen reduziert sich der Rohstoffkonsum (RMC) von 844 Mt im Status quo um 188 Mt (22 %) auf 656 Mt im Baseline-Szenario im Jahr 2045. Dies ist insbesondere auf den Rückgang aus den Bereichen Hochbau, Fahrzeuge, Beleuchtung und Lebensmittel zurückzuführen. Dementgegen kommt es bei IKT- und HH-Geräten, Textilien und Möbel zu einem Anstieg des Rohstoffkonsums zwischen Status quo und Baseline.

Die **Maßnahmen in den MDCE-Szenarien können im ambitioniertesten Mix-Szenario den Ressourcenkonsum um 179 Mt Rohstoffe (27 %) im Vergleich zur Baseline reduzieren**. Wird der Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen berücksichtigt reduziert sich die Einsparung im Mix-Szenario auf 79-150 Mt. Absolut gesehen liegen die höchsten Einsparpotenziale auf Grund der Größe des gesamten Rohstoffkonsums im Bereich Hochbau, gefolgt von Fahrzeugen und Lebensmittel. Im Mix-Szenario können somit allein in den drei Sektoren insgesamt zwei Drittel des Einsparpotenzials beim Rohstoffkonsum durch die modellierten CE-Maßnahmen realisiert werden. In den Bereichen IKT/HH-Geräte, Textilien und Tiefbau sind es zusammen weitere 27 %. Die MDCE-Maßnahmen bewirken einen stärkeren Rückgang bei abiotischen Rohstoffen, womit es zu einem leichten prozentualen Anstieg im biotischen Bereich kommt. Insgesamt sinkt aber der Konsum von sowohl abiotischen als auch biotischen Rohstoffen durch die MDCE-Maßnahmen. Die Reduktionspotenziale bei den abiotischen Rohstoffen entfallen zu 72 % auf die Sektoren Hochbau, Fahrzeuge und Tiefbau. Bei den biotischen Ressourcen entfallen 61 % der Reduktion allein auf den Nahrungsmittelsektor.

Im Vergleich zum Status quo führen die MDCE-Maßnahmen (im Mix-Szenario) zu einer Reduktion des RMC um ~370 Mt bis 2045. Für den gesamtdeutschen Rohstoffkonsum wird bis 2045/50 eine Reduktion von ~1.300 Mt in 2019 auf ~500 Mt diskutiert, dies entspricht einer Reduktion um 63 % (UBA 2019). Die Österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie und einige Stimmen aus der Literatur benennen Reduktionsziele um minus 80 % (BMK 2022; Bringezu 2015). Die MDCE-Maßnahmen tragen damit ca. die Hälfte der Reduktion des für das Erreichen des nachhaltigen Korridors nötigen Rohstoffkonsums bei (~44 %). Die Definition von MDCE-Maßnahmen war ambitioniert, aber realistisch. Sie zeigen die große Herausforderung der Transformation, denn die zweite Hälfte des Reduktionsbedarfs erfordert noch größere Anstrengungen und Veränderungen.

Landnutzung und Biodiversität

In der ökologischen Dimension Landnutzung gibt es vor allem auf Grund der Trendfortsetzung im Lebensmittelsektor aber auch durch weniger Bautätigkeit (demographischer Wandel) einen kleinen Rückgang um 2,5 Mio. ha (8 %) von heute 31,0 auf 28,5 Mio. ha in der Baseline. **Im Vergleich zur Baseline kann das ambitionierte MDCE-Mix-Szenario die Landnutzung im Jahr 2045 noch einmal deutlich um 8,5 Mio. ha (30 %) reduzieren**. Die MDCE-Maßnahmen bewirken somit Einsparungen von ca. 25 % der Gesamtfläche Deutschlands. Der Lebensmittelsektor hat hieran den größten Anteil, jedoch auch die Sektoren Fahrzeuge, Textilien und Hochbau tragen relevant bei.

Alle Landnutzungsarten (Acker, Wald, Weide, andere) erfahren einen Rückgang in der Landnutzung. Die Ergebnisse verdeutlichen den großen Einfluss des Lebensmittelsektors an den Gesamtentlastungspotenzialen aller Landnutzungsarten und unterstreichen den Einfluss der Reduktion von Fleisch- und Milchprodukten.

Durch Einbezug des Rebound-Effekts durch freiwerdendes Einkommen fällt die Reduktion der Landnutzung auf 1,1-6,1 Mio. ha oder 4-21 % gegenüber der Baseline. Die Landnutzung liegt dann je nach Ausgestaltung des Rebounds bei 22,4-27,4 Mio. ha. Im Umkehrschluss bedeutet es, dass der Rebound bei einer höheren Ausprägung nahezu die ganzen Einsparungen in der Landnutzung wieder aufzehren könnte.

Im Rahmen der MDCE-Studie wurden für die Sektoren Lebensmittel und Ernährung, Textilien und Möbel zusätzliche Biodiversitätseffekte der modellierten CE-Maßnahmen bewertet. Für den Sektor Lebensmittel und Ernährung sind die mit der Bereitstellung der Lebensmittel verbundenen Biodiversitätseffekte von hoher Bedeutung. Letzteres insbesondere bedingt durch die landwirtschaftliche Agrarprimärproduktion. Im Vergleich zum Status quo-Ernährung reduziert sich das Potenzial zum Biodiversitätsverlust um 13 % in der Baseline aufgrund des aktuellen Trends der Fleischreduktion von 1,3 % pro Jahr bis 2045. Bei einer jährlichen Fleischreduktion von 4,9 % bis 2045, der notwendigen Reduktion in Hinblick auf eine Planetary-Health-Diet-konforme Ernährungsweise in Deutschland, wird eine **Reduzierung des Biodiversitätsverlustpotenzials von ca. 32 % im Mix-Szenario** erreicht. Ursache für diese Effekte ist hauptsächlich die absolute Reduktion des Fleischkonsums in Deutschland.

Sozioökonomische Analyse

Die Wirkungen der CE-Maßnahmen auf die sozioökonomischen Indikatoren, Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf, sind komplex und müssen sorgfältig interpretiert werden. Die sozial- und wirtschaftspolitische Dimension einer ökologischen Transformation kann bei einer Fehlinterpretation kontroverse und konfliktreiche Debatten auslösen. Sorgen bezüglich Arbeitsplatzverlust, steigender Ungleichheiten, Wohlstandseinbußen, unkalkulierbarer Risiken, u.a. durch Umverteilung, verursachen Verunsicherung in der Gesellschaft, obwohl mehrheitlich ein Konsens über die vereinbarten Umwelt- und Klimaziele herrscht. Dies ist auch aktuell bei den Transformationsprozessen in der Energie- und Klimapolitik zu beobachten.

Die Ergebnisse zeigen, wie sich Änderungen der Nachfrage nach Gütern bzw. deren Produktionsweise auf die mit ihrer Herstellung verbundene Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf in Deutschland auswirken. Weitere gesamtwirtschaftliche Wirkungen wie z.B. Innovationseffekte, Preiseffekte, Wirkung auf den Außenhandel, zukünftige Investitionen wurden nicht in die Analyse einbezogen.[36] Die mit der inländischen Nachfrage nach diesen Gütern verbundene Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf in Deutschland entspricht etwa 15 % der gesamten Wertschöpfung und 20 % des gesamten Arbeitskräftebedarfs. **Die Ergebnisse sollten daher nicht als gesamtwirtschaftliche Folgenabschätzung einer Circular Economy für Deutschland interpretiert werden**.

Die Interpretation der Ergebnisse muss vor dem Hintergrund einer angenommenen Trendfortsetzung bis 2045 stattfinden. Die Grundlage dafür bildet der Projektionsbericht 2021 (Repenning et al. 2021), der für das Baseline-Szenario zugrunde gelegt wurde: Zum einen führen **der demographische Wandel und ein substanzieller Nachfragerückgang im Hochbau bereits zwischen Status**

[36] Für die Analyse wurde ein offenes multiregionales Input-Output Mengenmodell mit Umwelterweiterungen genutzt.

quo und dem Baseline-Szenario 2045 zu einer Reduktion der Bruttowertschöpfung im Hinblick auf die betrachteten Nachfragebereiche um 9 % auf 423 Mrd. €. Dieser Rückgang wirkt sich stärker aus als die zusätzliche Nachfrage in anderen Bereichen, wie z.B. nach IKT. Zum anderen wird im Jahr 2045 eine deutliche höhere Arbeitsproduktivität als im Status quo angenommen. Dies bedeutet, dass die gleiche Wertschöpfung mit deutlich weniger Arbeitskräften erbracht werden kann, beispielsweise aufgrund von Digitalisierung. Dadurch wird ein beständiges Wirtschaftswachstum ermöglicht, wobei das Arbeitskräftepotenzial gleichzeitig aufgrund des demographischen Wandels sinkt. Entsprechend verringert sich der Arbeitskräftebedarf im Baseline-Szenario im Vergleich zum Status quo. Der Rückgang des Arbeitskräftebedarfs ist somit im Wesentlichen auf die angenommene hohe Arbeitsproduktivität im Jahr 2045 zurückzuführen. Es ist wichtig hervorzuheben, dass die modellierten Nachfragerückgänge der Studie im Vergleich zum Status quo zu einem Rückgang des Arbeitskräftebedarfs von nur etwa 4 % im Baseline-Szenario führen. Bereits heute weisen viele Wirtschaftsbereiche einen Fachkräftemangel auf, z.B. das vom Rückgang im Baseline-Szenario stark betroffene Baugewerbe. In diesem Sinne sollte eine Reduktion des Arbeitskräftebedarfs nicht als Abweichung vom Ziel der Vollbeschäftigung interpretiert werden, sondern eher als Entlastung des Arbeitsmarktes im Hinblick auf Fachkräftemangel und sinkendes Arbeitskräftepotenzial.

Unterschiede zwischen der Baseline und den MDCE-Szenarien ergeben sich durch Änderungen in Nachfragehöhe (beispielsweise bei Maßnahmen, die zu weniger Konsumnachfrage führen) und Nachfragestruktur (beispielsweise bei Substitution von Primär- durch Sekundärproduktion oder von Autos mit Verbrennungsmotor durch E-Autos). Während nachfragereduzierende Maßnahmen auch Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf in direkt und indirekt betroffenen Wirtschaftsbereichen reduzieren, führen auf die Nachfragestruktur abzielende Maßnahmen je nach betroffenem Wirtschaftsbereich sowohl zu positiven als auch zu negativen Effekten. **Im Mix-Szenario und im Verhalten-Szenario spielen Nachfragerückgänge durch auf Vermeidung fokussierte Maßnahmen eine besonders große Rolle, wohingegen im Technologie-Szenario Substitution wichtiger ist**. Entsprechend fällt die Reduzierung der Bruttowertschöpfung in den direkt und indirekt betroffenen Wirtschaftsbereichen gegenüber der Baseline im Verhalten- und Mix-Szenario mit -19 % deutlich stärker aus als im Technologie-Szenario mit -6 %. In Bezug auf Arbeitskräftebedarf sieht es ähnlich aus, wobei die Effekte mit -16 % im Verhalten- und Mix-Szenario und -3,5 % im Technologie-Szenario etwas geringer sind. Dies deutet daraufhin, dass **eine leichte Verschiebung hin zu beschäftigungsintensiveren Bereichen stattfindet**. Die Modellierungsergebnisse zeigen damit auf, dass es auf dem Weg zu einer Circular Economy Zielkonflikte geben kann, z.B. zwischen Umwelt- und sozioökonomischen Indikatoren.

Geht man über die Betrachtung des Konsums in den ausgewählten Sektoren hinaus und berücksichtigt mögliche Rebound-Effekte durch freiwerdendes Einkommen, das zu mehr Nachfrage führt (40-170 Mrd. € je nach Szenario), dann werden **Reduzierung von Bruttowertschöpfung und Arbeitskräftebedarf je nach Ausprägung dieses Rebounds kompensiert oder sogar übertroffen**. Der Rebound durch freiwerdendes Einkommen führt zu steigender Bruttowertschöpfung und höherem Arbeitskräftebedarf, wenn das freiwerdende Einkommen für Konsumbereiche ausgegeben wird, die in der Studie nicht betrachtet wurden, da ihre Produktion und Nutzung im Vergleich zu den betrachteten Gütergruppen in den neun Sektoren mit einer geringeren Umweltbelastung verbunden sind. Dies sind vornehmlich Dienstleistungen aus dem Bereich Gesundheit, Bildung, Kultur und Freizeit. Das Mix-Szenario mit dieser Ausprägung des Rebound-Effekts zeichnet sich durch eine um 14 % höhere Wertschöpfung und einen um 11 % höheren Arbeitskräftebedarf im Vergleich zur Baseline aus. Hierbei ist zu beachten, dass durch dieses Vorgehen im Vergleich zur Baseline ein deutlich höherer Anteil der Nachfrage im Inland wirksam wird: die wegfallende Nachfrage betrifft Güter, die zu Teilen importiert werden, die hinzukommende Nachfrage betrifft im Inland erbrachte Dienst-

leistungen. Wird das freigewordene Einkommen hingegen beispielsweise für vermehrte Investitionsnachfrage (ohne Gebäude) genutzt, so fällt die Wirkung dieser zusätzlichen Nachfrage auf Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf geringer aus und liegt etwa auf dem Niveau des Baseline-Szenarios. Allerdings sollte beachtet werden, dass über die Nachfragewirkung hinausgehende gesamtwirtschaftliche Effekte von Investitionen (Innovationseffekte, Außenhandelseffekte, Produktivität etc.) nicht berücksichtigt sind.

An dieser Stelle ist es wichtig, hervorzuheben, dass die beschriebenen Effekte des in der Studie betrachteten Rebounds durch freiwerdendes Einkommen nicht überbewertet werden sollen. **Je nach Ausprägung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen können die Wirkungen sehr unterschiedlich sein, weshalb Bandbreiten angeben wurden, die jedoch nicht alle Extremfälle umfassen**. In der vorliegenden Studie wurde z.B. das freiwerdende Einkommen auf diejenigen Bereiche umverteilt, die geringere Umweltintensitäten aufweisen. Die ebenfalls denkbare Verausgabung des freiwerdenden Einkommens in Bereichen, die hohe Umweltbelastungen verursachen (z.B. Flugverkehr), wurde nicht untersucht. Hier können zwar positive Effekte für die Wirtschaftsindikatoren auftreten, aber mit erheblichen ökologischen Mehrbelastungen. Politikmaßnahmen etwa zur Vermeidung von negativen Umwelteffekten und Förderung von positiven soziökonomischen Entwicklungen, z.B. durch Investitionen in den Dienstleistungssektoren mit geringen Umweltintensitäten, können eine solche, nicht intendierte Entwicklung verhindern oder abschwächen.

Eine weitere Unsicherheit betrifft das zeitliche Auftreten des Rebound-Effekts. Beispielsweise können die Anschaffungskosten für ein langlebiges Produkt zunächst höher sein, die Einsparungen aufgrund der höheren Lebensdauer werden aber erst zu einem späteren Zeitpunkt erzielt. Da in manchen Sektoren (z.B. IKT und Haushaltsgeräten) mit Lebenszykluskosten gearbeitet wurde, ist hier eine gewisse Unschärfe gegeben. Auch wenn dies in Summe in der vorliegenden Studie nicht der Fall ist, kann bei Blick auf einzelne Maßnahmen zudem in vielen Fällen davon ausgegangen werden, dass die Kosten der CE-Maßnahme höher sind als Ersparnisse bzw. die Ersparnisse im Vergleich zu hohen Anfangsinvestitionen über einen großen Zeitraum verteilt sind und somit vernachlässigt werden können.

Wenn man von den Kosten der Transformation spricht, sollten die externen, gesamtgesellschaftlichen Kosten berücksichtigt werden. Denn sie zeigen, dass die Gesamtkosten einer ökologischen Transformation mit Circular Economy für die Gesellschaft deutlich geringer sind als für einzelne Akteure. **Die MDCE-Studie zeigt, dass die CE-Maßnahmen durch die Veränderung des Konsums in Deutschland globale Umweltkosten bis zu 157 Mrd. € vermeiden würden**. Die Berechnung bezieht sich auf die Monetarisierung der THG-Emissionen aus direkter Emission und veränderter Landnutzung (ohne Lebensmittel). Aus methodischer Sicht ist die Einschätzung zwar robust, stellt aber einen extrem unterschätzten Gesamtwert der Kostenvermeidungspotenzialen dar. Viele negativen Aspekte, wie Verlust der Biodiversität, Verschmutzung der Ökosysteme durch hohen Ressourcenverbrauch & Chemikalien, vorzeitige Sterblichkeit, Krankheiten und Verlust der Arbeitsproduktivität aufgrund von Luftverschmutzung, Naturkatastrophen, wie Überschwemmungen und Dürren, verursachen weitere Kosten, wie die im Rahmen der MDCE-Studie durchgeführte Literaturanalyse zeigt. Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass die ökonomischen Folgekosten des Klimawandels, der Ressourcennutzung und des Verlusts an Artenvielfalt höher liegen als das gesamte globale Bruttoinlandsprodukt.

Weitere ökonomischen Vorteile für die Wirtschaft ergeben sich dadurch, dass die CE-Maßnahmen die Versorgungssicherheit mit kritischen Rohstoffen verbessern und somit zu einer Stärkung der Resilienz der deutschen Wirtschaft beitragen.

Kritikalität: Änderung im Bedarf bzw. Bereitstellung kritischer und stark umweltbelastender Rohstoffe

Obwohl die Erhöhung der Versorgungssicherheit kein explizites Ziel der Circular Economy ist, spielen CE-Strategien eine wichtige Rolle bei der nachhaltigen Rohstoffsicherung (Tercero Espinoza 2020, Cimprich et al. 2022, Hool et al. 2022). Gleichzeitig wird zunehmend klar, dass eine verlässliche Rohstoffversorgung unabdinglich für die Erreichung von Klimazielen ist, allen voran bei der Umsetzung der Energiewende und der Verdrängung von fossilbetriebenen Verbrennungsmotoren durch E-Mobilität im Straßenverkehr (IEA 2021). Aber auch über die angestrebten Nachhaltigkeitstransformationen und ihre speziellen Rohstoffbedarfe hinaus, hat das vergangene Jahr 2022 erneut gezeigt, wie wichtig eine sichere Rohstoffversorgung für das Funktionieren der deutschen Wirtschaft ist. Dementsprechend groß ist momentan die Aufmerksamkeit insbesondere auch von politischer Seite für das Thema.

So hat die EU-Kommission gerade einen Vorschlag für einen Critical Raw Materials Act vorgelegt (EC 2023b). Dieser setzt für 2030 konkrete und rohstoffübergreifende Ziele im Hinblick auf eine sicherere Versorgungslage fest. CE-Strategien tragen zur Erreichung von drei der vier Ziele bei. So soll eine 15 %ige Deckung des Europäischen Bedarfs an kritischen und strategischen Rohstoffen aus dem heimischen Recycling erreicht werden. Darüber hinaus sollen 40 % der lokalen Rohstoffherstellung aus europäischen Quellen gedeckt werden. Der Ursprung aus primären oder sekundären Quellen bleibt offen, die Circular Economy könnte den auch aus Nachhaltigkeitsperspektive meist zu bevorzugendem Sekundäranteil steigern. Indirekt trägt die CE außerdem dazu bei, das Ziel einer Limitierung der Abhängigkeit von einem einzelnen Land auf maximal 65 % des jährlichen Bedarfs zu beschränken. Die rohstoffbedarfsmindernden CE-Maßnahmen erleichtern die Erreichung dieses Ziels, da es leichter ist, die reduzierten Mengen auch von "kleineren" Produktionsländern zu beziehen.

Auch wenn die vorliegende MDCE-Studie mit 2045 einen anderen Zeithorizont als die EU-Ziele hat, so zeigt sie doch klar, dass CE-Maßnahmen signifikante Beiträge zur Verbesserung der Versorgungssicherheit mit Rohstoffen leisten kann. **Über alle betrachteten Sektoren können mit der Umsetzung der modellierten CE-Maßnahmen bei 29 von 36 relevanten Rohstoffen der Bedarf insgesamt reduziert oder der Anteil der durch Recycling zur Verfügung gestellten Sekundärrohstoffe gesteigert werden. Beides trägt zur Entspannung des Rohstoffbedarfs dieser 29 Rohstoffe bei.**

Das ausgeprägteste Entspannungspotenzial hinsichtlich der Versorgungssituation beim Rohstoffabbau ist dabei für Palladium, Yttrium, Dysprosium, Neodym, Terbium, Kobalt, Kupfer, Praseodym und Gallium (9 Rohstoffe) möglich, deren angenommener Bedarf für das Jahr 2045 gemäß Baseline zu mehr als +50 % durch die CE-Maßnahmen gedeckt werden kann. Dies ist insbesondere bedeutsam, da **acht dieser neun Rohstoffe bereits heute von der EU als kritisch bezüglich ihrer Versorgungslage eingeschätzt** werden. Kupfer, das als nicht-kritisch bewertet wird, bleibt jedoch aufgrund seiner Bedeutung für die digitale und grüne Transformation, die europäische Verteidigung und Raumfahrt zusammen mit der Erwartung einer stark steigenden Nachfrage als *strategischer* Rohstoff im Fokus (EC 2023a).

Fünf der neun Rohstoffe mit den größten Veränderungspotenzialen haben ein hohes Umweltgefährdungspotenzial, und zwar Kobalt, Kupfer, Neodym, Praseodym und Palladium. Das **Umweltgefährdungspotenzial von Gallium, Dysprosium, Terbium und Yttrium wurde als mittel bis hoch** eingeschätzt. Kann die Nachfrage nach den Rohstoffen durch die CE-Maßnahmen reduziert werden, werden folglich die miteinhergehenden Umweltwirkungen gemildert. Im besten Fall geht die Primärproduktion durch einen Bedarfsrückgang ersatzlos zurück. Durch Recycling und

eine erhöhte Sekundärproduktion werden die Umweltwirkungen der Primärproduktion gedämpft, und durch in der Regel mildere Umweltwirkungen der Sekundärproduktion ersetzt. Somit kann die Circular Economy auch zu einer umfangreichen Reduktion der Umweltwirkungen der Rohstoffbereitstellung und einen Erhalt der natürlichen Ressourcen beitragen.

In vielen Fällen kann somit eine Entspannung der Versorgungssicherheit sowie eine Minderung der mit den Rohstoffen verbunden Umweltauswirkungen erreicht werden.

Die größten Gewinne können in den Sektoren Fahrzeuge (Veränderungspotenziale von mindestens +5 % bei 15/20 Rohstoffen) erzielt werden. Der Sektor IKT/Haushaltsgeräte ist derjenige, der die meisten Rohstoffe (30) aller Sektoren umfasst und somit Potenzial für die Verbesserung der Versorgungssicherheit einer Vielzahl von Rohstoffen hat. Die Sektoren Beleuchtung und Lebensmittel sind zwar für weniger Rohstoffe relevant (10 bzw. 5), können jedoch für einzelne Rohstoffe wie Phosphate oder Yttrium die Versorgungslage beträchtlich entspannen.

Betrachtet man die Summe der Veränderungspotenziale über alle Sektoren wird deutlich, dass die größten Veränderungen nicht durch einzelne Sektoren oder Maßnahmen, sondern durch das Zusammenwirken aller Maßnahmen erreicht werden können.

Im Ganzen betrachtet zeigt sich also deutlich, dass die Resilienz der deutschen (oder europäischen) Wirtschaft gegenüber möglichen Versorgungsengpässen bei Rohstoffimporten durch die Circular Economy deutlich gestärkt werden kann.

Methodik

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Modellierung einer Circular Economy in neun Sektoren in Deutschland beruht auf einer engen Zusammenarbeit von Expert*innen für Sektoren, Ökobilanzierung, EE-MRIO und Industriemodellierung. Das hybride Modellsystem ermöglichte es, die spezifischen Schwächen und Grenzen von Top-down- und Bottom-up-Modellen zu überwinden und die Stärken der unterschiedlichen Modelle zu nutzen. Auf diese Weise konnten die Effekte der Circular Economy für jeden der untersuchten Sektoren umfassend modelliert und analysiert und gleichzeitig die Wirkungen einzelner CE-Maßnahmen mit hohem Detaillierungsgrad untersucht werden.

EE-MRIO wurde hierfür mit Ökobilanzen aus der Literatur integriert betrachtet, um die Passgenauigkeit der Übersetzung zu prüfen und die Ergebnisse aus einer Bottom-up-Modellierungsperspektive zu ergänzen. Ergänzt wurde die Analyse durch ein weiteres Bottom-up-Simulationsmodell FORECAST, das den Endenergieverbrauch und die direkten Emissionen des Industriesektors abbildet und Aussagen zu den Beiträgen einer umgesetzten Circular Economy zur Dekarbonisierung des deutschen Industriesektors liefert.

Der methodische Ansatz ermöglicht eine sehr detaillierte Analyse mit Ergebnissen zu THG-Emissionen, Landnutzung von Wald, Weide und Ackerland, biotischer und abiotischer Ressourcennutzung (RMC und TMC), Wertschöpfung mit Löhnen und Gewinnen sowie der Entwicklung der Arbeitskräftenachfrage differenziert nach Geschlecht und Bildungsniveau.

Die Vorgehensweise zur Abschätzung der Auswirkungen einer erfolgreich umgesetzten Circular Economy auf die Versorgungssicherheit beruht auf der Bilanzierung potenzieller Änderungen im Rohstoffbedarf bzw. -angebot. Dabei wird die Kritikalität der Rohstoffe ausdrücklich nicht neu bewertet, sondern der Effekt der CE-Maßnahmen auf die ausgewählten Rohstoffe in den Vordergrund gerückt. Dies ist ein vergleichsweise annahmearmes Verfahren, das im Gegensatz zu der Erstellung

einer neuen Methodik zur Bestimmung der Rohstoffkritikalität kein zusätzliches Gedankenmodell (d.h., welche Faktoren bedingen die Rohstoffkritikalität, wie sind diese zu bewerten, wie miteinander verbunden, zu quantifizieren und zu aggregieren?) erfordert. Die Aussagen sind somit robuster und wenig wertungsbehaftet. Die Rohstoffbilanzierung baut qualitativ und quantitativ auf die Modellierungsergebnisse im Projekt auf und sichert daher die direkte Passfähigkeit der Ergebnisse zu denen aus anderen Projektteilen.

Die Datenbasis der EE-MRIO-Modellierung und der Ökobilanzen beruht allerdings auf Status quo-Werten. Die Projektionen für 2045 verweisen dadurch auf aktuelle statische Verflechtungen zwischen Produktionsbereichen und Ländern sowie ökologischen und sozioökonomischen Parametern. EE-MRIO ist ein etabliertes Verfahren, bei dem diese Aspekte jedoch nicht dynamisch angepasst werden. Darauf wurde reagiert, indem die Veränderungen der Nachfrage z.B. beim Strommix, der Elektromobilität oder der Arbeitsproduktivität an den Rahmenparametern des Projektionsberichts 2021 und darüber hinaus ausgerichtet wurden. Durch die detaillierte Modellierung in FORECAST wurde die Dekarbonisierung über die CE-Maßnahmen hinaus adressiert.

Trotz der vergleichsweise hochauflösenden Datenbasis von EXIOBASE fehlte es für die Modellierung einzelner Sektoren und ihrer Maßnahmen teils an Detailgrad in der Auflösung. Durch den hybriden Ansatz konnte in ausgewählten Fällen auf LCA-Daten zurückgegriffen werden. Die Analyse wurde zudem auf neun hoch relevante Sektoren beschränkt, die jedoch in ihrem Umfang nicht repräsentativ für die Gesamtwirtschaft sind und daher auch nicht dementsprechend interpretiert werden können.

Mit den Wirkmodellen zielten die Sektorexpert*innen auf eine umfassende Einschätzung der mit einer Maßnahme einhergehenden Effekte und technischen Rebounds. Mit der Ausarbeitung der Wirkmodelle ging eine Komplexitätsreduktion einher, die zum Teil auf fehlende Datengrundlagen und daraus resultierende Einschränkungen bei der Quantifizierung der Wirkungen zurückzuführen ist. Weitere nicht erfasste Effekte sind daher möglich. Trotz Unsicherheiten wurde der Rebound durch freiwerdendes Einkommen in die Analyse miteinbezogen, da es sich ansonsten um eine Teilbetrachtung handelt, die auf die Wirkung der veränderten Nachfrage in den betrachteten Sektoren beschränkt ist. Eine Analyse, die den Rebound mit einbezieht, kann zu einer ganzheitlicheren Einschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen führen. Damit liefert die MDCE-Studie wertvolle Hinweise an die Politik, die Gesetzgebung und Implementierung stetig in Bezug auf Rebounds zu bewerten.

6 Fazit und Ausblick

Die MDCE-Studie analysiert die ökologischen und ökonomischen Folgenabschätzungen von CE-Maßnahmen in neun Sektoren in Deutschland. Die ökologischen Wirkungen werden für Treibhausgasemissionen, Ressourceninanspruchnahme und Landnutzung sowie teilweise für Biodiversität bewertet. Bei den volkswirtschaftlichen Indikatoren untersucht die Studie die Wirkungen auf Bruttowertschöpfung, Arbeitskräftebedarf und Rohstoffkritikalität bzw. Versorgungssicherheit für die deutsche Wirtschaft. Die Studie deckt, im Gegensatz zu vielen Modellierungsstudien, CE-Maßnahmen in allen 10-R-Strategien ab und zeigt damit ein insgesamt differenziertes Bild im Hinblick auf die sozioökonomischen Effekte. Mit dem breiten Verständnis der Circular Economy werden sowohl positive als auch negative Effekte auf die sozioökonomischen Indikatoren in verschiedenen Wirtschaftsbereichen sichtbarer. Obwohl die Studie nicht die gesamte Wirtschaft Deutschlands abbildet und die Ergebnisse der Studie nicht im Sinne einer gesamtwirtschaftlichen Folgenabschätzung interpretiert werden dürfen, stellt die Studie mit der Vielfalt der betrachteten Themen und komplexen Wirkzusammenhänge einen **Meilenstein für den Circular Economy-Diskurs in Deutschland** dar. Die Studie verfolgt einen robusten, wissenschaftlichen Ansatz einschließlich eines hybriden Modellansatzes, in dem die Stärken verschiedener Modelltypen im Rahmen des zur Verfügung stehenden zeitlichen Rahmens eingesetzt wurden. Gleichwohl geht die Studie offen mit Schwächen und Datenlücken, die bei jeder Modellierung eines komplexen Systems auftreten, um und zeigt somit den zukünftigen Forschungsbedarf.

Die zusätzliche Modellierung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen ist sehr annahmeabhängig. Die Ergebnisse sind daher nicht als abschließende Modellierung eines gesamtwirtschaftlichen Effekts zu interpretieren. Die dargestellten Bandbreiten zeigen einerseits Unsicherheiten in Bezug auf die konkrete Ausprägung des Rebound-Effekts auf, andererseits weisen sie auch auf einen gewissen Handlungsspielraum für Politikmaßnahmen hin, um die ökologischen Vorteile der CE-Maßnahmen in ihrem vollen Potenzial auszuschöpfen und gleichzeitig potenziell negative sozioökonomischen Effekte durch gezielte Interventionen in den Bereichen mit geringeren Umweltintensitäten abzufedern.

Diese Studie nimmt die Konsumgüter mit hohen Umweltfolgen in neun Sektoren innerhalb Deutschlands ins Visier. Aus ökologischer Sicht betrachtet sie den Fußabdruck der in Deutschland lebenden Menschen. Die Studie zeigt, dass die modellierten CE-Maßnahmen zweifelsohne einen großen Beitrag für den globalen Klima-, Ressourcen-, und Biodiversitätsschutz leisten können. Eine gesamtwirtschaftliche Analyse erfordert jedoch nicht nur den Blick auf die Nachfrage, sondern auch auf die gesamte Produktion und Erbringung von Dienstleistungen in Deutschland. Ein Ausblick in diese Richtung wird in der Studie durch die Satellitenanalyse Industrietransformation sowie durch die Analyse der Effekte auf die Versorgungssicherheit mit Rohstoffen geschaffen. Beide Analysen nehmen eine produktionsseitige Perspektive ein und zeigen bedeutende positive Potenziale der Circular Economy auf. Innerhalb dieser Studie konnte nur eine grobe Übertragung der konsumseitig definierten CE-Maßnahmen auf die Produktion geleistet werden. **Eine umfassendere Ausarbeitung der CE-Maßnahmen für die Produktion** würde detailliertere Ergebnisse auf dieser Ebene erbringen.

Die CE-Maßnahmen erzeugen aber auch einen gesellschaftlichen Zielkonflikt: insbesondere führen die auf Vermeidung fokussierten Maßnahmen zum Rückgang von Wertschöpfung und Arbeitskräftebedarf in den in der MDCE-Studie betrachteten Bereichen. Für eine detaillierte **Bewertung von sozioökonomischen Effekten** ist die Betrachtung weiterer Parameter wichtig, die im Rahmen dieser Studie (u.a. auch wegen fehlender Daten) nicht ausreichend berücksichtigt werden konnten. Einige Beispiele sind:

- Einfluss von Investitionen, z.B. in die Sammelstrukturen zur Vorbereitung für Wiederverwendung und Recycling oder in den Ausbau von Werkstätten für Reparaturen. Zusätzliche Investitionen sind mit entsprechendem Wachstumspotenzial verbunden.
- Einfluss auf Preise, z.B. Preisunterschiede sekundär vs. Primärmaterialien, und Wirkung CE-Maßnahmen auf Preise;
- Einfluss auf Verteilungseffekte, z.B. unterschiedliche Betroffenheit sozialer Gruppen durch die CE-Maßnahmen;
- Einfluss auf den Außenhandel, z.B., wie wirken veränderte Produktionskosten auf Wettbewerbsfähigkeit und wie verändert sich generell die weltweite Nachfragestruktur, wenn man davon ausgeht, dass CE auch in anderen Teilen der Welt umgesetzt wird.
- Einfluss des Strukturwandels auf unterschiedliche Regionen, in denen bestimmte Branchen stark vertreten sind. Der Strukturwandel kann für bestimmte Regionen auch eine Chance darstellen.
- Einfluss auf sozioökonomische Auswirkungen im globalen Kontext, z.B., welche Chancen und Risiken entstehen im globalen Süden, wenn der Verbrauch von Primärrohstoffen oder Konsumgütern in Industrieländern zurückgeht.

In der Studie wurde die Bruttowertschöpfung als einziger Wohlstandsindikator gewählt. Es zeigte sich, dass insbesondere Vermeidungsmaßnahmen zu Wertschöpfungsverlusten in Wirtschaftsbereichen führen, die dadurch eine geringere Nachfrage erfahren. Die Maßnahmengestaltung nimmt jedoch eine Nachfrageminderung bei (potenziell) äquivalentem Nutzen der Konsumente*innen an. Die Bruttowertschöpfung als alleiniger Wohlstandsindikator kann daher in Frage gestellt werden. Eine breitere **Analyse des Zusammenhangs zwischen Circular Economy und Wohlstand** scheint sinnvoll.

Hier stellt sich auch die Frage, wie Wohlstand zu definieren ist. Ein nur auf den Konsum materieller Güter und auf das Bruttoinlandsprodukt fokussierter Wohlstandsbegriff scheint hier zu kurz gegriffen. Mit der Analyse der externen Kosten hat die Studie gezeigt, dass die hohen Umwelt- und sozialen Kosten unserer derzeitigen Produktions- und Konsumweise die Lebensqualität der Menschen erheblich beeinträchtigen, Vulnerabilität gegenüber Katastrophen und Versorgungsunsicherheiten erhöhen und somit auch den Wohlstand gefährden können.

Bei der Modellierung des Rebounds durch freiwerdendes Einkommen wurde angenommen, dass die Menschen auch in einem CE-Szenario im gleichen Maße ihre Arbeitskraft zur Verfügung stellen und somit die gleiche Menge an Einkommen zur Verfügung steht wie im Baseline-Szenario. Es sind aus der Perspektive der Suffizienz jedoch auch andere Szenarien denkbar, etwa, dass eine bewusste Entscheidung in Richtung weniger Arbeit und Einkommen getroffen wird. Dann könnte eine Reduktion des Arbeitskräftebedarfs z.B. nicht als Abweichung vom Ziel der Vollbeschäftigung interpretiert werden, sondern eher als Entlastung des Arbeitsmarktes im Hinblick auf Fachkräftemangel und sinkendes Arbeitskräftepotenzial. Ein solches Szenario liefert die Grundlage, um **neue Formen der Beschäftigung**, z.B. 4-Tage Arbeitswoche, mehr Zeit für die Gemeinschaft und Umwelt, mit entsprechenden Ausgleichsmechanismen zu diskutieren und zu experimentieren.

Nicht zuletzt fehlt im politischen Diskurs bisher der Blick für die globale Ressourcengerechtigkeit. Der kontinuierlich hohe Ressourcenverbrauch in Deutschland kann kein zukünftiges, nachhaltiges Wirtschaftsmodell bilden. Er verursacht nicht nur eine erhebliche Umweltverschmutzung, sondern ist auch für eine Reihe von sozialen und menschenrechtlichen Verstößen in den Abbauregionen verantwortlich. In diesem Sinne zeigt die Studie, dass die CE-Maßnahmen einen wichtigen Beitrag bei der Reduktion des Rohstoffkonsums (RMC) sowie des gesamten Materialaufwandes (TMC) leis-

ten. Mit **detaillierteren Sektor-Modellierungen, v.a. mithilfe von auf Ökobilanz basierten Bottom-up-Analysen**, könnte die Berechnung dieses Beitrags weitere Potenziale aufzeigen. Dabei könnte die **Rolle von Innovationen und Technologietrends in den jeweiligen Sektoren** mit deutlich höherer Granularität analysiert werden. Beispielsweise könnte die Bedeutung der Digitalisierung in den einzelnen Sektoren sehr unterschiedlich ausgeprägt sein.

Die Studie hat allerdings gezeigt, dass der reine Technologiefokus nicht ausreicht, um die großen Umweltentlastungspotenziale der Circular Economy zu realisieren. Zwar hätte eine größere Auswahl an technologieinduzierten Maßnahmen zu höheren Umweltentlastungen im Technologie-Szenario geführt als in der MDCE-Studie berechnet, die Ergebnisse zeigen jedoch deutlich das Ausmaß der **Umweltentlastungspotenziale durch den verhaltensbedingten Wandel,** also einen grundsätzlichen Wechsel von unseren aktuellen Konsummustern und die Abkehr von einem Wirtschaftsmodell, das auf einem überproportionalen Verbrauch natürlicher Ressourcen beruht.

Das Ziel der MDCE-Studie war nicht, einen Wachstumsdiskurs anzuregen oder das Wirtschaftswachstum zu bewerten. Diese werden in der einschlägigen Literatur bereits ausreichend diskutiert. Mit ihrem breiten Verständnis der Circular Economy und der Bewertung von auf Vermeidung oder – anders ausgedrückt – auf Suffizienz fokussierten Maßnahmen liefert die MDCE-Studie wichtige Impulse für einen gesellschaftlichen Dialog über die zukünftige Wirtschaftsstruktur. Die Studie zeigt die Notwendigkeit eines Strukturwandels in denjenigen Bereichen, die heute für große Umweltbelastungen verantwortlich sind. Die Akzeptanz eines entsprechenden Strukturwandels in der Gesellschaft kann allerdings nur dann gelingen, wenn die Zielkonflikte durch die sozialpolitische Flankierung eines breiten Instrumentenkastens adressiert und von einem offenen gesellschaftlichen Dialog über den notwendigen Strukturwandel begleitet werden. Wichtig ist dabei, die Zieldimension nicht aus den Augen zu verlieren. Das oberste Ziel ist der Schutz planetarer Lebensgrundlagen, wie auch im folgenden Satz formuliert: „*Ökologische Nachhaltigkeit ist nicht alles, aber ohne sie ist alles nichts*“ (Holzmann et al. 2022).

Bei verbesserter Datengrundlage in den einzelnen Sektoren sowie mit deutlich längeren Zeithorizonten können andere Studien zwar zu anderen quantitativen Ergebnissen gelangen, die Grundaussagen und Schlussfolgerungen der MDCE-Studie bleiben aber wissenschaftlich robust und stellen eine solide, richtungssichere Grundlage für die Politik. Die Studie liefert Impulse für die Entwicklung des MDCE-Politik Blueprints, worin Empfehlungen für konkrete Ziele, Strukturen und Politikinstrumente beschrieben werden, wie sie die modellierten CE-Maßnahmen umsetzen können. Das MDCE-Vorhaben leistet somit einen wichtigen Beitrag für den Dialogprozess und die Gestaltung der im Frühjahr 2024 geplanten Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) in Deutschland.

Literaturverzeichnis

ADAC (2019): SUV gegen Standardmodell – was ist die bessere Wahl?, ADAC. Online verfügbar unter https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/kauftipps/suv-standardmodell-vergleich/, zuletzt aktualisiert am 2019, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

ADEME, I.: Agribalyse. Version 3.0.

AGEB - AG Energiebilanzen e.V. (Hg.) (2008-2020a): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Jahre 2008-2018. Stand 2008 für die Jahre 1990-2002, Stand 2012 für die Jahre 2003-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016, Stand 2019 für das Jahr 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018. AG Energiebilanzen, 2008-2020, 2008-2020. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020&wpv_aux_current_post_id=45&wpv_aux_parent_post_id=45&wpv_view_count=2753-CATTRe4257049c177cf191052746afc46d0a3, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

AGEB - AG Energiebilanzen e.V. (Hg.) (2008-2020b): Satellitenbilanz Erneuerbare Energien, Jahre 2000-2018. Stand 2008 für die Jahre 2000-2002, Stand 2010 für die Jahre 2003-2008, Stand 2012 für die Jahre 2009-2010, Stand 2013 für das Jahr 2011, Stand 2014 für das Jahr 2012, Stand 2015 für das Jahr 2013, Stand 2016 für das Jahr 2014, Stand 2017 für das Jahr 2015, Stand 2018 für das Jahr 2016, Stand 2019 für das Jahre 2017, Stand 2020 für das Jahr 2018. AG Energiebilanzen, 2008-2020, 2008-2020. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020&wpv_aux_current_post_id=45&wpv_aux_parent_post_id=45&wpv_view_count=2753-CATTRe4257049c177cf191052746afc46d0a3, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

AGEB - AG Energiebilanzen e.V. (Hg.) (2022): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Berlin, 2022. Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Amjadi, G.; Lundgren, T.; Persson, L. (2018): The Rebound Effect in Swedish Heavy Industry. In: *Energy Economics* 71, S. 140–148. DOI: 10.1016/j.eneco.2018.02.001.

Asam, C. (2008): Recycling prefabricated concrete components – a contribution to sustainable construction. Berlin, 2008. Online verfügbar unter https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB11828.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

AWG Wuppertal (2023): Gebühren und Preise, Müllheizkraftwerk. AWG Wuppertal (Hg.). Online verfügbar unter https://awg-wuppertal.de/privatkunden/gebuehren-und-preise.html, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Barker, T.; Dagoumas, A.; Rubin, J. (2009): The macroeconomic rebound effect and the world economy. In: *Energy Efficiency* 2 (4), S. 411–427. DOI: 10.1007/s12053-009-9053-y.

Baufachfrau e.V. (Hg.) (2011): Möbelpass, Ein Leitfaden für Nachhaltige Möbelbewertung, 2011. Online verfügbar unter https://www.baufachfrau-berlin.de/wp-content/uploads/2019/07/bff_moebelpass_versand.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

BCG (2021): Klimapfade 2.0, Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Boston Consulting Groups. Bundesverband der Deutschen Industrie (Hg.), 2021. Online verfügbar unter https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

BCG; Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. Boston Consulting Groups; Prognos AG. Bundesverband der Deutschen Industrie (Hg.), 2018. Online verfügbar unter https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20180118_bdi_studie_klimapfade_fuer_deutschland_01.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

BCG; Prognos (2019): Analyse Klimapfade Verkehr 2030. Boston Consulting Groups; Prognos AG. Bundesverband der Deutschen Industrie (Hg.), 2019. Online verfügbar unter https://bdi.eu/publikation/news/analyse-der-klimapfade-verkehr-2030/, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Berwald, A.; Faninger, T.; Bayramoglu, S.; Tinetti, B.; Mudgal, S.; Stobbe, L.; Nissen, N. (2015): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC, DG ENTR Lot 9 – Enterprise servers and data equipment – Task 5: Environment & Economics. Bio by Deloitte; Fraunhofer IZM. European Commission (Hg.), 2015. Online verfügbar unter https://www.eceee.org/static/media/uploads/site-2/ecodesign/bio_entr_lot_9_task_5_fv_20150731.pdf, zuletzt geprüft am 22.02.2023.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hg.) (2022): Deutschland – Rohstoffsituation 2021. Hannover, 2022. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Blok, R.; Smits, J.; Gkaidatzis, R.; Teuffel, P. (2019): Bio-Based Composite Footbridge: Design, Production and In Situ Monitoring. In: *Structural Engineering International* 29 (3), S. 453–465. DOI: 10.1080/10168664.2019.1608137.

BMDV - Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Forschungs-Informations-System für Mobilität und Verkehr, Bundesministerium für Digitales und Verkehr. Online verfügbar unter https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/1/, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (Hg.) (2022): Die österreichische Kreislaufwirtschaft, Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, 2022. Online verfügbar unter https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:ccbbe6aa-d0eb-4dbb-ae50-cab89e251cd5/Kreislaufwirtschaftsstrategie_Begutachtungsentwurf.pdf, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

BMVI (2016): Bundesverkehrswegeplan 2030. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Berlin, 2016. Online verfügbar unter https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

BMWi (2021): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2020. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuer-bare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html, zuletzt aktualisiert am 16.03.2021.

BMWK - Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): Elektrotechnik- und Elektronikindustrie, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-elektrotechnik-und-elektronikindustrie.html, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, zuletzt geprüft am 01.11.2022.

Bookhagen, B.; Bastian, D.; Buchholz, P.; Faulstich, M.; Opper, C.; Irrgeher, J.; Prohaska, T.; Koeberl, C. (2020): Metallic resources in smartphones. In: *Resources Policy* 68, S. 101750. DOI: 10.1016/j.resourpol.2020.101750.

Braat, L.; Brink, P. ten (2008): The Cost of Policy Inaction, The case of not meeting the 2010 biodiversity target. Alterra rapport 1718. Unter Mitarbeit von C. Klok; H. Gerdes; M. Kettunen; N. Peralta-Bezerra; A. Chiabai et al. Alterra, Wageningen, 2008. Online verfügbar unter https://www.ecologic.eu/de/12982.

Breisig, V.; Hess, B.; Rath, L. (2022): Ökonomische Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr, Abschlussbericht. Texte 33/2022. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau, April 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_33-2022_oekonomische_bewertung_von_klimaschutzmassnahmen_im_verkehr.pdf.

Bringezu, S. (2015): Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. In: *Resources* 4 (1), S. 25–54. DOI: 10.3390/resources4010025.

Brockway, P. E.; Sorrell, S.; Semieniuk, G.; Heun, M. K.; Court, V. (2021): Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141, S. 110781. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110781.

Buchert, M.; Degreif, S.; Schüler, D.; Prakash, S.; Möller, M.; Köhler, A.; Behrendt, S.; Scharp, M.; Röben, A. (2019): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen, Arbeitsbericht 2: Abschätzung des Materialbedarfs der 40 prioritären Umwelttechnologien in den Szenarien Business-As-Usual und Green-Economy. Öko-Institut; Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. Umweltbundesamt (Hg.), 2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-08_texte_03-2019_subskrit_arbeitsbericht-2.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D.; Pingel, D. (2012): Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Öko-Institut e.V. Öko-Institut e.V (Hg.). Darmstadt, 2012. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/1375/2012-010-en.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2023.

Bulach, W.; Dehoust, G.; Hermann, A.; Möck, A.; Keimeyer, F.; Christiani, J.; Bartnik, S.; Beckamp, S.; Börgers, M. (2022a): Überprüfung der Wirksamkeit des § 21 VerpackG und Entwicklung von Vorschlägen zur rechtlichen Weiterentwicklung. Umweltbundesamt (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_118-2022_ueberpruefung_der_wirksamkeit_des_ss_21_verpackg_und_entwicklung_von_vorschlaegen_zur_rechtlichen_weiterentwicklung.pdf, zuletzt geprüft am 12.01.2023.

Bulach, W.; Dehoust, G.; Mayer, F.; Möck, A. (2022b): Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Öko-Institut e.V. Berlin, Darmstadt, 2022. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale_Systeme_Oekobilanz_Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

BUND - Bund für Umwelt und Naturschutz (Hg.) (2021): Nachhaltige Urbane Mobilitätswende bis 2030: Forderungen an die Bundesregierung, 2021. Online verfügbar unter https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/Verkehr_Urbane_Mobilita__tswende_2030_BUND-Handlungskonzept.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Bundesverfassungsgericht (2021): Beschluss des Ersten Senats vom 24. März 2021 – 1 BvR 2656/18 – Rn. 1-270, 24.03.2021. Online verfügbar unter https://www.bundesverfassungsgericht.de/SharedDocs/Entscheidungen/DE/2021/03/rs20210324_1bvr265618.html, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

BVSE (2020): Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland, Bonn Deutschland, Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung. Online verfügbar unter https://www.bvse.de/dateien2020/1-Bilder/03-Themen_Ereignisse/06-Textil/2020/studie2020/bvse %20Alttextilstudie %202020.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Carlsson Kanyama, A.; Nässén, J.; Benders, R. (2021): Shifting expenditure on food, holidays, and furnishings could lower greenhouse gas emissions by almost 40 %. In: *Journal of Industrial Ecology* 25 (6), S. 1602–1616. DOI: 10.1111/jiec.13176.

Cayé, N.; Schüler, K. (2022): Schätzung ambitionierter Vermeidungspotenziale bei Verpackungen in Deutschland, veröffentlicht im Rahmen des WWF-Projekts "Modell Deutschland Circular Economy" für das Öko-Institut im Anhang des Berichts "Modellierung und Folgenabschätzung einer Circular Economy in 9 Sektoren in Deutschland". Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (Hg.). Mainz, 2022.

CE Delft (2020): Handbook on the external costs of transport, Version 1.1. European Comission, Directorate-General for Mobility and Transport. Unter Mitarbeit von van Essen, H.; van Wijngaarden, L.; Schroten, A.; Sutter, D.; Bieler, C. et al. Europäische Kommission, D.-M. (Hg.). Luxembourg, 2020. Online verfügbar unter https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_4K83_Handbook_on_the_external_costs_of_transport_Final.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

CEID (2021): Kunststoffverpackungen im geschlossenen Kreislauf – Potenziale, Bedingungen. Unter Mitarbeit von acatech/SYSTEMIQ. Circular Economy Initiative Deutschland (Hg.). München/London, 2021. Online verfügbar unter https://static1.squarespace.com/static/5b52037e4611a0606973bc79/t/61c1e6fc7c5caa3018718e8d/1640097555427/VP+Gesamtbericht+DE_DOI.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

CHI (2021): Prüfung und Testierung der Recyclingfähigkeit – Anforderungs- und Bewertungskatalog des Institutes cyclos-HTP zur EU-weiten Zertifizierung – CHI-Standard, Fassung 5.0. Institut cyclos-HTP GmbH (Hg.). Aachen, September 2021. Online verfügbar unter https://sc10d7d3c6be8f168.jimcontent.com/download/version/1682344557/module/7415664259/name/Anforderungs- %20und %20Bewertungskatalog %20Version %205.0.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Christiani, J. (2017a): Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen, Status und Potenziale. Dialogforum Kreislaufwirtschaft. Berlin, 18.10.2017.

Christiani, J. (2017b): Stand der Technik und Herausforderungen für einzelne Verpackungsmaterialen, Vortrag bei AGVU, BDE und BVSE Symposium. Berlin, Dezember 2017.

Christiani, J. (2022): Ergebnisse eines internen Workshops zu den Potenzialen zur Steigerung der Recyclinganteile im Bereich von Verpackungen. Institut cyclos – HTP GmbH. Aachen/Berlin, November 2022.

Christiani, J.; Dehoust, G. (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe, Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung (Texte, 40/2012). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, 2012. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4342.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Circle Economy (Hg.) (2022): The Circularity Gap Report 2022. Amsterdam, 2022. Online verfügbar unter https://www.circularity-gap.world/2022#Download-the-report, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Coelho, A. M. G.; Pimentel, R.; Ungureanu, V.; Hradil, P.; Kesti, J. (2020): European recommendations for reuse of steel products in single-storey buildings. ECCS – European Convention for Constructional Steelwork (Hg.), 2020. Online verfügbar unter https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/PROGRESS_Design_guide_final-version.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Conversio (2020): Einsatz von Neuware und Rezyklat im Bereich von Kunststoffverpackungen. Conversio Market & Strategy GmbH (Hg.). Mainaschaff, September 2020.

Cooper, D. R.; Allwood, J. M. (2012): Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life. In: *Environmental Science & Technology* 46 (18), S. 10334–10340. DOI: 10.1021/es301093a.

Dehoust, G.; Hermann, A.; Christiani, J.; Bartnik, S.; Beckamp, S.; Bünemann, A. (2021): Ermittlung der Praxis der Sortierung und Verwertung von Verpackungen im Sinne des § 21 VerpackG (Texte, 11/2021). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, 2021. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-01-22_texte_11-2020_oekologische_beteiligungsentgelte.pdf, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Auberger, A.; Kämper, C.; Ackern, P. von; Rüttinger, L.; Rechlin, A.; Priester, M. (2020): Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II, 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekoress-ii.

destatis - Statistisches Bundesamt (2019): 14. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung - Basis 2018, 2019. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Be-voelkerungsvorausberechnung/aktualisierung-bevoelkerungsvorausberechnung.html.

destatis - Statistisches Bundesamt (2023a): Konsumausgaben privater Haushalte je Haushalt und Monat. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/_Grafik/_Interaktiv/konsumausgaben-zeitvergleich.html, zuletzt aktualisiert am 02.12.2022, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

destatis - Statistisches Bundesamt (2023b): Wichtige Bevölkerungsindikatoren zu den EU-Staaten. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Basistabelle/Bevoelkerung.html, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Deutsche Bundesregierung (2022): Elektrogesetz, Fassung 3. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/ElektroG.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

DG DROW - European Commission (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, 2017. Online verfügbar unter https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7345e3e8-98fc-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

DG DROW - European Commission (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, 2017. Online verfügbar unter https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en, zuletzt geprüft am 18.07.2022.

Dimitropoulos, J. (2007): Energy productivity improvements and the rebound effect: An overview of the state of knowledge. In: *Energy Policy* 35 (12), S. 6354–6363. DOI: 10.1016/j.enpol.2007.07.028.

Dornbusch, H.-J.; Hannes, L.; Santjer, M.; Böhm, C.; Wüst, S.; Zwisele, B.; Kern, M.; Siepenkothen, H.-J.; Kanthak, M. (2020): Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien (Texte, 113/2020). UBA - Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_113-2020_analyse_von_siedlungsrestabfaellen_abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Dräger de Teran, J. (2021): So schmeckt Zukunft: Gesunde Ernährung für eine gesunde Erde - WWF Positionspapier. WWF (Hg.). Berlin, 2021. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/wwf-position-so-schmeckt-zukunft.pdf, zuletzt geprüft am 24.03.2023.

Dräger de Teran, T. (2022): So schmeckt Zukunft: Der kulinarische Kompass für eine gesunde Erde, Ernährung und biologische Vielfalt. Unter Mitarbeit von Köberich, T.; Eberle, U.; Mumm, N. und Meier, T. WWF Deutschland (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Landwirtschaft/WWF-studie-kulinarischer-kompass-biodiversitaet-ernaehrung.pdf, zuletzt geprüft am 08.05.2023.

Drenckhahn, D.; Steinicke, H.; Arneth, A.; Filser, J.; Haberl, H.; Hansjürgens, B.; Herrmann, B.; Homeier, J.; Leuschner, C.; Mosbrugger, V.; Reusch, T. B. H.; Schäffer, A.; Scherer-Lorenzen, M. et al. (2020): Globale Biodiversität in der Krise - was können Deutschland und die EU dagegen tun? Dokumentationsband zu Diskussion Nr. 24 (Diskussion / Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina). Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften. Halle (Saale), 2020. Online verfügbar unter https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2020_Diskussionspapier_Biodiversitaetskrise_web.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Duhoux, T.; Maes, E.; Hirschnitz-Garbers, M.; Peeters, K.; Asscherickx, L.; Christis, M.; Stubbe, B.; Colignon, P.; Hinzmann, M.; Sachdeva, A. (2021): Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling: final report. European Commission (Hg.), 2021. Online verfügbar unter https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/739a1cca-6145-11ec-9c6c-01aa75ed71a1/language-en, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Dünnhoff, E.; Palm, A. (2017): Marktcheck Leuchten - Energieverbrauchskennzeichnung von Leuchten und Marktanteil von Leuchten mit fest verbauten LEDs - Ergebnisse des fünften Marktchecks 2016. Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e.V. (Hg.), 2017. Online verfügbar unter https://www.verbraucherzentrale-rlp.de/sites/default/files/migration_files/media240632A.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

EAR - Stiftung Elektro-Altgeräte Register (2020): Jahres-Statistik-Mitteilung. Nürnberg: Stiftung EAR. Online verfügbar unter https://www.stiftung-ear.de/de/service/statistische-daten/jahres-statistik-mitteilung, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

EAR - Stiftung Elektro-Altgeräte Register (2022): Gerätebezogene b2c Inputmengen. Nürnberg: Stiftung EAR. Online verfügbar unter https://www.stiftung-ear.de/fileadmin/Bilder/StatDaten/Input_GA-bezogen_b2c.png, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

EC - European Commission (2010): Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Brussels, 2010. Online verfügbar unter https://www.euromines.org/files/what-we-do/sustainable-development-issues/2010-report-critical-raw-materials-eu.pdf, zuletzt geprüft am 29.01.2013.

EC - European Commission (2020a): Durchführungsbeschluss (EU) 2020/2126 der Kommission vom 16. Dezember 2020 zur Festlegung der jährlichen Emissionszuweisungen an die Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2021 bis 2030 gemäß der Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates, European Commission. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX %3A32020D2126, zuletzt geprüft am 15.03.2021.

EC - European Commission (2020b): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Critical Raw Materials Factsheets (final). Unter Mitarbeit von Latunussa, C.; Georgitzikis, K.; Torres de Matos, C.; Grohol, M.; Eynard, U. et al. Luxembourg, 2020. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Cristina-Matos-9/publication/344124391_Study_on_the_EU %27s_list_of_Critical_Raw_Materials_2020_Critical_Raw_Materials_Factsheets_Final/links/5f5364ef92851c250b9297c4/Study-on-the-EUs-list-of-Critical-Raw-Materials-2020-Critical-Raw-Materials-Factsheets-Final.pdf?origin=publication_detail, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EC - European Commission (2020c): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Final Report. Unter Mitarbeit von Blengini, G. A.; Latunussa, C.; Eynard, U.; Torres de Matos, C.; Wittmer, D. et al. Luxembourg, 2020. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42883/attachments/1/translations/en/renditions/native, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EC - European Commission (2020d): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020), Non-Critical Raw Materials Factsheets. Unter Mitarbeit von Eynard, U.; Georgitzikis, K.; Wittmer, D.; Latunussa, C.; Torres de

Matos, C. et al. Luxembourg, 2020. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Cristina-Matos-9/publication/344124637_Study_on_the_EU %27s_list_of_Critical_Raw_Materials_2020_Non-Critical_Raw_Materials_Factsheets/links/5f5368cd92851c250b929973/Study-on-the-EUs-list-of-Critical-Raw-Materials-2020-Non-Critical-Raw-Materials-Factsheets.pdf?origin=publication_detail, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EC - European Commission (2022a): EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles., Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2022) 141 final. Brussels, 2022. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX %3A52022DC0141, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EC - European Commission (2022b): Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC. Brüssel, 30.11.2022. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX %3A52022PC0677, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EC - European Commission (2022c): Questions & Answers on the Regulation on Packaging and Packaging Waste. Brüssel, 30.11.2022. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_22_7157, zuletzt geprüft am 02.05.2023.

EC - European Commission (2023a): European Critical Raw Materials Act - Annex 1 to 6, Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/102. COM(2023) 160, 16.03.2023. Online verfügbar unter https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en.

EC - European Commission (2023b): European Critical Raw Materials Act, Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/102. COM(2023) 160, 16.03.2023. Online verfügbar unter https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/european-critical-raw-materials-act_en, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EC - European Commission (Hg.) (2018): Verordnung (EU) 2018/841 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 und des Beschlusses Nr. 529/2013/EU. Brüssel, 2018. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv %3AOJ.L_.2018.156.01.0001.01.DEU, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EEB - European Environment Bureau (2017a): Circular economy opportunities in the furniture industry. Brüssel, 2017. Online verfügbar unter https://eeb.org/wp-content/uploads/2019/05/Report-on-the-Circular-Economy-in-the-Furniture-Sector.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

EEB - European Environment Bureau (Hg.) (2017b): Circular Economy Opportunities in the Furniture Sector, 2017. Online verfügbar unter https://eeb.org/library/circular-economy-opportunities-in-the-furniture-sector/, zuletzt geprüft am 24.02.2023.

Ellen MacArthur Foundation (Hg.) (2021): The Nature Imperative, How the circular economy tackles biodiversity loss. Sector Deep-Dive: Textiles, 2021. Online verfügbar unter https://ellenmacarthurfoundation.org/fashion-examples, zuletzt geprüft am 25.03.2023.

Elliott, C.; Yamada, M.; Penning, J.; Schober, S.; Lee, K. (2019): Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications. U.S. Department of Energy (Hg.). Washington, DC, 2019. Online verfügbar unter https://www.osti.gov/servlets/purl/1607661, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Ennen, D.; Heilker, T. (2020): Ride-Hailing Services in Germany: Potential Impacts on Public Transport, Motorized Traffic, and Social Welfare, Working Paper No. 29. Institute of Transport Economics Münster; Westfälische Wilhelms-Universität, 2020. Online verfügbar unter https://www.wiwi.uni-muenster.de/ivm/sites/ivm/files/documents/forschung/diskussionspapiere/workingpaper29.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

EPA - United States Environmental Protection Agency (2022): Fluorinated Greenhouse Gas Emissions and Supplies Reported to the GHGRP. United States Environmental Protection Agency (Hg.). Online verfügbar unter https://www.epa.gov/ghgreporting/fluorinated-greenhouse-gas-emissions-and-supplies-reported-ghgrp #production, zuletzt aktualisiert am 01.12.2022, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Eurostat (2023a): Municipal waste statistics. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_generation, zuletzt aktualisiert am 28.02.2023.

Eurostat (2023b): Packaging waste statistic, 2023. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics, zuletzt geprüft am 02.05.2023.

Eurostat (2023c): Produktion von Waren (Prodcom) - Überblick. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/prodcom.

EXIOBASE Consortium (2023): Welcome to EXIOBASE. Online verfügbar unter https://www.exiobase.eu/, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

FAPRI-ISU (Hg.) (2011): World Agricultural Outlook, 2011.

Flamme, S.; Hams, S.; Bischoff, J.; Fricke, C. (2020): Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung. Umweltbundesamt (Hg.), 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/evaluierung-der-altholzverordnung-im-hinblick-auf, zuletzt geprüft am 24.02.2023.

Flaute, M.; Reuschel, S.; Stöver, B. (2022): Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel: Szenarioanalyse bis 2050, Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland. Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung IÖW, Prognos AG. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH (Hg.). Osnabrück, 2022. Online verfügbar unter https://papers.gws-os.com/gws-researchreport22-2.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Fleiter, T.; Rehfeldt, M. (2022): Instrumente für eine klimaneutrale Industrie - Eine modellgestützte Szenarioanalyse des aktuellen Instrumentenmixes, Ariadne-Analyse. Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/media/2022/10/Ariadne-Analyse_Politikinstrumente-Industrie_Oktober2022.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Elsland, R.; Klingler, A.-L.; Manz, P.; Eidelloth, S. (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.

Freyer, B.; Hahn, A.; Kratochvil, R.; Vilsmaier, U.; Zingerle, C. (2005): Das transdisziplinäre Lehrforschungsprojekt 'Leben 2014' - Neue Wege der Kooperation zwischen Wissenschaft und Praxis in der Regionalentwicklung. In: *SIR - Mitteilungen und Berichte* 31, S. 189–199.

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O. (1998): Scenario Management: An Approach to Develop Future Potentials - Technological Forecasting and Social Change. In: *Technological Forecasting and Social Change* 59 (2),

S. 111–130. Online verfügbar unter https://www.hni.uni-paderborn.de/en/publications/publikationen/?tx_hnippview_pi1 %5Bpublikation %5D=274, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2023): Siegelklarheit. Siegelverzeichnis. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (Hg.). Online verfügbar unter https://www.siegel-klarheit.de/siegelverzeichnis#/holz-holzprodukte;sort:rating_desc, zuletzt geprüft am 02.05.2023.

Glass Packaging Institute (2023): Glass Colorization. Glass Packaging Institute (Hg.). Online verfügbar unter https://www.gpi.org/, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Glöser, S.; Tercero Espinoza, L.; Gandenberger, C.; Faulstich, M. (2015): Raw material criticality in the context of classical risk assessment. In: *Resources Policy* 44, S. 35–46. DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.12.003.

Groep, R. (2019): The new SmartLiberator fully recycles used concrete into raw materials to make new concrete. Online verfügbar unter https://www.youtube.com/watch?v=s7GUXnsrxBk&t=73s, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Groneweg, M.; Bittner, C.; Hoffman, T.; Neussl, V.; Paasch, A.; Reckord, M.; Schilder, K.; Tempelmann, M. (2021): Weniger Autos, mehr globale Gerechtigkeit, Von: Brot für die Welt, Evangelisches Werk für Diakonie und Entwicklung e. V., Bischöfliches Hilfswerk MISEREOR e. V., PowerShift - Verein für eine ökologisch-solidarische Energie- und Weltwirtschaft e. V. Berlin, 2021. Online verfügbar unter https://www.brot-fuer-die-welt.de/fileadmin/mediapool/downloads/fachpublikationen/sonstige/Weniger_Autos__mehr_globale_Gerechtigkeit_-_2021-web.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Gsell, M.; Dehoust, G.; Keimeyer, F.; Möck, A.; Klinski, S. (2022): Ökologische Verbrauchsteuer zur umweltfreundlichen Lenkung des Getränkeverpackungsmarktes, Studie zum ökologischen Nutzen und zur rechtlichen Machbarkeit für den NABU (Naturschutz-bund Deutschland) e.V. Berlin, 2022. Online verfügbar unter https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/090322-nabu-oeko-institut-studie-getraenkeverpackung-steuer-mehrweg.pdf, zuletzt geprüft am 23.01.2023.

Günther, J.; Lehmann, H.; Lorenz, U.; Pfeiffer, D.; Purr, K. (2018): Towards a Resource Efficient and Greenhouse Gas Neutral Germany 2050. In: Lehmann, H. (Hg.): Factor X, Bd. 32. Cham: Springer International Publishing (Eco-Efficiency in Industry and Science), S. 417–425.

Günther, M.; Jacobsen, B.; Rehme, M.; Götze, U.; Krems, J. F. (2020): Understanding user attitudes and economic aspects in a corporate multimodal mobility system: results from a field study in Germany. In: *Eur. Transp. Res. Rev.* 12 (1). DOI: 10.1186/s12544-020-00456-0.

GVM (2020): Potenzial zur Verwendung von Recycling-Kunststoffen in der Produktion von Kunststoffverpackungen in Deutschland. GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH; BKV GmbH. Mainz, März 2020.

GVM (2022): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020. Unter Mitarbeit von Burger, A.; Cayé, N. und Schüler. Kurt (Texte | 109/2022). Umweltbundesamt (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aufkommen-verwertung-von-verpackungsabfaellen-in-16, zuletzt geprüft am 22.01.2023.

Harmstone, A. (2020): Five Sectors That Cannot Escape Climate Change (Investment Management). Morgan Stanley (Hg.), 2020. Online verfügbar unter https://www.morganstanley.com/im/publication/insights/articles/articles_fivesectorsthatcannotescapeclimatechange_us.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Herbst, A. (2017): Kopplung eines makroökonomischen Modells mit einem "bottom-up" Energienachfrage-Modell für die Industrie, Eine Fallstudie über die Stahlindustrie. Dissertation, Universität Flensburg. Flensburg, 2017. Online verfügbar unter https://www.zhb-flensburg.de/?id=24955, zuletzt geprüft am 29.03.2023.

Hertwich, E.; Lifset, R.; Pauliuk, S.; Heeren, N. (2020): Resource Efficiency and Climate Change, Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. International Resource Panel; United Nations Environment Programme. Nairobi, 2020. Online verfügbar unter https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Hintemann, R.; Hinterholzer, S.; Graß, M.; Grothey, T. (2022): Rechenzentren in Deutschland, Aktuelle Marktentwicklungen, Stand 2022. Borderstep Institut; Grass Consulting. Bitkom (Hg.), 2022. Online verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/10.02.22-studie-rechenzentren.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Holzmann, S.; Petersen, T.; Posch, D.; Wortmann, M. (2022): Nachhaltige Soziale Marktwirtschaft, Wirtschaftspolitische Ziele und Zielkonflikte in der ökologischen Transformation 1. Aufl. Gütersloh: Verlag Bertelsmann Stiftung.

Huuhka, S.; Lahdensivu, J. (2014): Statistical and geographical study on demolished buildings. In: *Building Research and Information* 44 (1). DOI: 10.1080/09613218.2014.980101.

Hvac-buzz Team (2022): How Long Does IKEA Furniture Last. Online verfügbar unter https://hvac-buzz.com/how-long-ikea-furniture-last/, zuletzt aktualisiert am 22.02.2023.

IBIS World (2022): Reparatur von Möbeln und Einrichtungsgegenständen in Deutschland, Marktforschung, Kennzahlen, Statistiken, Studien und Analysen. IBIS World (Hg.). Online verfügbar unter https://www.ibisworld.com/de/branchenreporte/reparatur-moebeln-einrichtungsgegenstaenden/643/, zuletzt aktualisiert am 31.03.2022, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

IINAS: GEMIS. Online verfügbar unter www.gemis.de.

International Fertilizer Association (2019): Fertilizer Consumption - Historical Trends by Country or Region, International Fertilizer Association.

IPCC (2022): Climate Change and Land, Technical Summary. International Panel on Climate Change (Hg.), 2022.

IPCC (2023): Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Summary for Policymakers. International Panel on Climate Change (Hg.), 2023.

Iritani, D. R.; Silva, D.; Saavedra, Y.; Grael, P.; Ometto, A. R. (2015): Sustainable strategies analysis through Life Cycle Assessment: a case study in a furniture industry. In: *Journal of Cleaner Production* 96, S. 308–318. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.029.

Jenkins, J.; Nordhaus, T.; Shellenberger, M. (2011): Energy Emergence: Rebound and Back-fire as Emergent Phenomena. Breakthrough Institute, 2011. Online verfügbar unter https://s3.us-east-2.amazonaws.com/uploads.thebreakthrough.org/legacy/blog/Energy_Emergence.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

KBA - Kraftfahrt-Bundesamt (2021): Inländerfahrleistung, Kraftfahrt-Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/2020/2020_vk_kurzbericht.html, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Kemna, R.; Lemeire, C.; den Boorn, R. von; Wierda, L.; Jeffcott, S.; Vanhooydonck, L.; van Tichelen, P.; Ectors, D.; Lam, W. C. (2015a): Preparatory Study on Light Sources for Ecodesign and/or Energy Labelling Requirements (‘Lot 8/9/19’), Final report, Project Summary. European Commission (Hg.). Brussel, 2015. Online verfügbar unter https://ecodesign-lightsources.eu/sites/ecodesign-lightsources.eu/files/attachments/Light-Sources %20Project %20Summary %20Final %2020151209.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Kemna, R.; Lemeire, C.; den Boorn, R. von; Wierda, L.; Jeffcott, S.; Vanhooydonck, L.; van Tichelen, P.; Ectors, D.; Lam, W. C. (2015b): Preparatory Study on Light Sources for Ecodesign and/or Energy Labelling Requirements ('Lot 8/9/19'), Final report, Task 7 Scenarios. European Commission (Hg.), 2015. Online verfügbar unter https://ecodesign-lightsources.eu/sites/ecodesign-lightsources.eu/files/attachments/Light-Sources %20Task7 %20Final %2020151031.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Knappe, F.; Muchow, N.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Kaiser; Felix (2023): Erarbeitung von Grundlagen für die Evaluierung der Gewerbeabfallverordnung. Unter Mitarbeit von ifeu – Heidelberg, u.e.c. Berlin (Texte, 47/2023). UBA - Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau, März 2023. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-von-grundlagen-fuer-die-evaluierung-der, zuletzt geprüft am 31.03.2023.

Le Den, X.; Porteron, S.; Collin, C.; Hvid Horup Sorensen, L.; Herbst, A.; Rehfeldt, M.; Pfaff, M.; Hirschnitz-Garbers, M.; Velten, E. (2020): Quantification methodology for, and analysis of, the decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions. Final report. Ramboll; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research und Ecologic Institute (Hg.), 2020. 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 05.05.2023.

Li, J.; Lin, B. (2017): Rebound effect by incorporating endogenous energy efficiency: A comparison between heavy industry and light industry. In: *Applied Energy* 200, S. 347–357. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.087.

Lightcycle GmbH (23.11.2022): Das Sammel-, und Verwertungssystem von Altlampen in Deutschland. von Valentin Fiala (FU Berlin). Interview mit Lightcycle GmbH. Online.

Llorca, M.; Jamasb, T. (2017): Energy efficiency and rebound effect in European road freight transport. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 101, S. 98–110. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.002.

Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Ostertag, K.; Rosenberg, S.; Tercero Espinoza, L.; Pfaff, M.; Sartorius, C. (2020): Potenziale und Grenzen der Sekundärrohstoffgewinnung - Ergebnisse der r 4-Begleitforschung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (4), S. 414–422. DOI: 10.1002/cite.201900132.

Lotz, M. T.; Herbst, A. (unveröffentlicht): newTRENDs deliverable 6.1 - Focus study report on decarbonization and circular economy in industry., unveröffentlicht.

Lotz, M. T.; Herbst, A.; Müller, A.; Kranzl, A.; Rosales Carreon, J.; Worrell, E. (unveröffentlicht): A material flow model of steel and concrete in EU buildings., unveröffentlicht.

Markandya, A. (2015): The Economic Feedbacks of Loss of Biodiversity and Ecosystem Services. OECD Environment Working Papers No. 93. Organisation for Economic Cooperation and Development, 2015. Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/5jrqgv610fg6-en.pdf?expires=1676377273&id=id&accname=ocid56027324&checksum=0338997873C72B985A4E3D56B2F76EA3, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Maisel, F.; Marwede, M.; Neef, C. et al. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 (DERA Rohstoffinformationen, 50). Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hg.). Berlin, 2021. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 12.07.2021.

Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S. L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M. I.; Huang, M.; Leitzell, K.; Lonnoy, E. et al. (2021): Climate Change 2021: The Physical Science

Basis., Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Group to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. IPCC (Hg.). Cambridge, New York, 2021. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Material Economics (Hg.) (2018): The Circular Economy - a Powerful Force for Climate Mitigation. Stockholm, 2018. Online verfügbar unter https://materialeconomics.com/material-economics-the-circular-economy.pdf?cms_fileid=340952bea9e68d9013461c92fbc23cae, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

McKinsey & Company (2009): Pathways to a Low Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2009. Online verfügbar unter https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/cost %20curve %20pdfs/pathways_lowcarbon_economy_version2.ashx, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

McKinsey & Company (2020): Net-Zero Europe, Decarbonization Pathways and Socioeconomic Implications. Unter Mitarbeit von D'Aprile, P.; Engel, H.; van Gendt, G.; Helmcke, S.; Hieronimus, S. et al. McKinsey & Company, 2020. Online verfügbar unter https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business %20functions/sustainability/our %20insights/how %20the %20european %20union %20could %20achieve %20net %20zero %20emissions %20at %20net %20zero %20cost/net-zero-europe-vf.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Metabolic (Hg.) (2022): Modelling the Renovation of Buildings in Europe from a Circular Economy and Climate Perspective. European Environment Agency, 2022. Online verfügbar unter https://www.eea.europa.eu/publications/building-renovation-where-circular-economy/modelling-the-renovation-of-buildings/download, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Mostert, C.; Bringezu, S. (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.

MZVO - Müllabfuhr Zweckverband Odenwald (2018): Gebührenkalkulation des MZVO für das Jahr 2018. Müllabfuhr Zweckverband Odenwald (Hg.). Online verfügbar unter https://www.mzvo.de/gebuehren.php, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

NABU - NABU-Bundesverband; BCG - Boston Consulting Group (2020): Wirtschaften im Einklang mit der Natur, Handlungswege zur Sicherung der Biodiversität, 2020. Online verfügbar unter https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2020/09/200923-nabu-bcg-studie-biodiv.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

NAOS - National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2017): Assessment of Solid-State Lighting, Phase Two. Washington, D.C.: National Academies Press.

Nemry, F.; Uihlein, A. (2008): Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building). JRC Scientific and Technical Reports (Hg.). Sevilla (Spanien), 2008. Online verfügbar unter https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC46667/reqno_jrc46667_jrc46667 %5B1 %5D %5B1 %5D.pdf.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Neofotografi (2023): Circular Flow Diagram 4 Sektor. Neofotografi (Hg.). Online verfügbar unter https://neofotografi.blogspot.com/2020/05/circular-flow-diagram-4-sektor.html, zuletzt aktualisiert am 14.03.2023, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Noleppa, S.; Cartsburg, M. (2015): Das grosse Wegschmeissen: vom Acker bis zum Verbraucher, Ausmaß und Umwelteffekte der Lebensmittelverschwendung in Deutschland. WWF Deutschland, 2015. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Studie_Das_grosse_Wegschmeissen.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

North West Europe (2023): Smart Circular Bridge for a circular built environment, Interreg Project. North West Europe (Hg.). Online verfügbar unter https://www.nweurope.eu/projects/project-search/smart-circular-bridge-scb-for-pedestrians-and-cyclists-in-a-circular-built-environment/#tab-1, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

NRC (2008): Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. National Research Council, 2008. Online verfügbar unter http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12034, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

OECD - Organisation for Economic Cooperation and Development (2012): OECD-Umweltausblick bis 2050, Die Konsequenzen des Nichthandelns. Paris, 2012. Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264172869-de.pdf?expires=1676373423&id=id&accname=ocid56027324&checksum=C3C10CC185EB3C2179A2CA482984D904, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

OECD - Organisation for Economic Cooperation and Development (2016): The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution. Paris, 2016. Online verfügbar unter https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264257474-en.pdf?expires=1676457065&id=id&accname=ocid56027324&checksum=AC3064A033009267EE563B2C3DA02DEC, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

OECD (2018): Financing Climate Futures, Rethinking Infrastructure: Policy Highlights. Gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt,Naturschutz und nukleare Sicherheit BMU, OECD; UN Environment, World Bank: OECD Publishing. Online verfügbar unter https://www.oecd.org/environment/cc/climate-futures/policy-highlights-financing-climate-futures.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Pauliuk, S.; Heeren, N.; Berrill, P.; Fishman, T.; Nistad, A.; Tu, Q.; Wolfram, P.; Hertwich, E. G. (2021): Global scenarios of resource and emission savings from material efficiency in residential buildings and cars. In: *Nature communications* 12 (1), S. 5097. DOI: 10.1038/s41467-021-25300-4.

Peck, D. (2019): A historical perspectiveof critical materials, 1939 to 2006. In: Offerman, S. E. (Hg.): Critical Materials: WORLD SCIENTIFIC (World Scientific Series in Current Energy Issues, 05), 85-101.

Prakash, S.; Antony, F.; Köhler, A.; Liu, R.; Schlösser, A. (2016a): Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC). Öko-Institut; Technische Universität Berlin. Umweltbundesamt (Hg.), 2016. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/endbericht_oko-apc_2016_09_27.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Prakash, S.; Dehoust, G.; Gsell, M.; Schleicher, T.; Stamminger, R. (2016b): Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Öko-Institut; Universität Bonn, Institut für Landtechnik. Umweltbundesamt (Hg.), 2016. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_11_2016_einfluss_der_nutzungsdauer_von_produkten_obsoleszenz.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Prakash, S.; Gensch, C.; Dehoust, G.; Antony, F.; Stuber-Rousselle, K.; Löw, C.; Betz, J.; Herbst, A.; Loibl, A.; Pfaff, M.; Jacob, K.; Fiala, V. (2022): Modell Deutschland Circular Economy, Machbarkeitsstudie im Auftrag des WWF Deutschland, 2022. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/publikationen/p-details/modell-deutschland-circular-economy, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

Prakash, S.; Löw, C.; Jacob, K.; Fiala, V.; Dehoust, G.; Gascón Castillero, L.; Hurst, K.; Helleckes, H.; Manhart, A. (2023): Modell Deutschland Circular Economy, Politik-Blueprint als Beitrag für die nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie in Deutschland., 2023.

Quicker, P.; Stockschäder, J. (2018): Möglichkeiten einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft durch weitergehende Gewinnung von Rohstoffen aus festen Verbrennungsrückständen aus der Behandlung von Siedlungsabfällen. UBA (Hg.), 2018.

Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R. et al. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES GmbH; Thünen-Institut, 2021. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/publikationen/p-details/projektionsbericht-2021-fuer-deutschland, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

Ritzenhoff, A. (2019): Materialeffiziente Massenfertigung von LED-Leuchtmitteln am Standort Deutschland - LED-Business. BMUB-Umweltinnovationsprogramm, 2019. Online verfügbar unter https://www.umweltinnovationsprogramm.de/projekte/materialeffiziente-massenfertigung-von-led-leuchtmitteln-am-standort-deutschland-led, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Rizos, V.; Bryhn, J.; Alessi, M.; Campmas, A.; Zarra, A. (2019): Identifying the Impact of the Circular Economy on the Fast-Moving Consumer Goods Industry, Opportunities and challenges for businesses, workers and consumers - mobile phones as an example. The European Economic and Social Committee (Hg.), 2019. Online verfügbar unter https://www.eesc.europa.eu/en/our-work/publications-other-work/publications/identifying-impact-circular-economy-fast-moving-consumer-goods-fmcg-industry-opportunities-and-challenges-businesses, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Rüdenauer, I.; 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 (Pedelecs). Öko-Institut. Verbraucherzentrale Bundesverband (Hg.), 2020. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/vzbv-Verlaengerung-Nutzungsdauer.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Schaffartzik, A.; Eisenmenger, N.; Krausmann, F.; Weisz, H. (2014): Consumption-based Material Flow Accounting. In: *Journal of Industrial Ecology* 18 (1), S. 102–112. DOI: 10.1111/jiec.12055.

Seitz, M.; Cepus, V.; Klätte, M.; Thamm, D.; Pohl, M. (2020): Evaluierung unter Realbedingungen von thermisch-chemischen Depolymerisationstechnologien (Zersetzungsverfahren) zur Verwertung von Kunststoffabfällen, Beauftragt und fachlich begleitet von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Hochschule Merseburg. Merseburg, 2020. Online verfügbar unter https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-34351_01-Hauptbericht.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2023.

Signify Holding (Hg.) (2019a): Managed Services Circular Lighting, Case study: Bruynzeel Storage Systems, The Netherlands, 2019. Online verfügbar unter https://www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/Assets/signify/global/20200207-bruynzeel-storage-systems-case-study.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Signify Holding (Hg.) (2019b): Managed Services Circular Lighting, Case study: High Tech Campus Eindhoven, 2019. Online verfügbar unter https://www.assets.signify.com/is/content/PhilipsLighting/Assets/signify/global/20191211-htc-case-study.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

SITRA (Hg.) (2022): Tackling Root Causes, Halting biodiversity loss through the circular economy, 2022. Online verfügbar unter https://www.sitra.fi/app/uploads/2022/05/sitra-tackling-root-causes-1.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Smetana, S.; Mathys, A.; Knoch, A.; Heinz, V. (2015): Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. In: *Int J Life Cycle Assess* 20 (9), S. 1254–1267. DOI: 10.1007/s11367-015-0931-6.

Sovacool, B. K.; Kim, J.; Yang, M. (2021): The hidden costs of energy and mobility: A global meta-analysis and research synthesis of electricity and transport externalities. In: *Energy Research & Social Science* 72, S. 101885. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101885.

Stadtmobil (2023): Stadtmobil, Stadtmobil. Online verfügbar unter https://www.stadtmobil.de/, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Statista (2022a): Konsumausgaben der privaten Haushalte in Deutschland für Bekleidung in den Jahren 1991 bis 2021 (in Milliarden Euro), 2022. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283616/umfrage/konsumausgaben-fuer-bekleidung-in-deutschland/, zuletzt geprüft am 15.02.2023.

Statista (2022b): Nettoumsatz im Einzelhandel mit Textilien und Bekleidung in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2020 (in Millionen Euro), 2022. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/172581/umfrage/umsatz-im-textil-fachhandel-seit-2007/, zuletzt geprüft am 11.02.2023.

Statista (2023): Verteilung der Faserproduktion weltweit nach Faserart im Jahr 2021, Statista. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/967838/umfrage/verteilung-der-faserproduktion-weltweit-nach-faserart/, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Statistisches Bundesamt (2023): Aufkommen an Haus- und Sperrmüll 2021. Statistisches Bundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/_Grafik/_Interaktiv/abfallwirtschaft-entsorgung-bundeslaender.html, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Stern, N. H. (2006): The economics of climate change, The Stern review. Cambridge: Cambridge University Press.

Tercero Espinoza, L. A. (2020): Zusammenhänge zwischen Circular Economy und Rohstoffkritikalität. In: Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Goldmann, D. und Friedrich, B. (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (13), S. 54–61, zuletzt geprüft am 22.10.2020.

TRT; M Five; Fraunhofer ISI (2021): AsTra model - Assessment of Transport Strategies. TRT; M Five und Fraunhofer ISI (Hg.). Online verfügbar unter http://www.astra-model.eu/, zuletzt aktualisiert am 15.03.2021, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Trunk, W. (2022): Regulation on Packaging and Waste, DG Environment Directorate Circular Economy;, Vortrag auf der 5. Konferenz zum Verpackungsrecycling befasst sich mit Herausforderungen für die Kreislaufwirtschaft in Krisenzeiten. Berlin, 14.12.2022.

Tschachtli, S.; Nordsieck, H.; Brehm, C.; Rommel, W. (2019): Funktionierende Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Altlampensammlung, Möglichkeiten kollektiver Rücknahmesysteme. Online verfügbar unter https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR12/2019_rur_363-378_tschachtli.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Tukker, A.; Jansen, B. (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.

UBA - Umweltbundesamt (2020a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018, Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission. Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de_0.pdf, zuletzt aktualisiert am 05.05.2023.

UBA - Umweltbundesamt (2020a): Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen, Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“, Teil 1, 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bewertung-klimawandelgebundener-risiken, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

UBA - Umweltbundesamt (2020b): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Stand 02/2019. Unter Mitarbeit von Astrid Matthey und Björn Bünger., 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-11-12_methodenkonvention-3-0_methodische-grundlagen.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

UBA - Umweltbundesamt (2020b): UBA. Zentrales System Emissionen (ZSE), Datenausspielung, Stand 01.09.2020.

UBA - Umweltbundesamt (2021): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen, Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#wozu-dienen-umweltkostenschatzungen, zuletzt geprüft am 09.03.2023.

UBA - Umweltbundesamt (2022a): Elektro- und Elektronikaltgeräte. Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete#sammlung-und-verwertung-von-elektro-und-elektronikaltgeraten-drei-kennzahlen-zahlen, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

UBA - Umweltbundesamt (2023): Glossar - Treibhausgas. Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/service/glossar/t?tag=Treibhausgas#alphabar, zuletzt aktualisiert am 04.04.2023, zuletzt geprüft am 15.07.2022.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität, RESCUE: Langfassung, 2019. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2020c): Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2018 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2020, Teilbericht. cyclos GmbH. Dessau-Roßlau, 2020. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-datenerhebungen-elektrog-ustatg-2018, zuletzt geprüft am 14.03.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2020d): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten, Kostensätze Stand 12/2020. Unter Mitarbeit von Matthey, A. und Bünger, B. Dessau-Roßlau, 2020.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2022b): Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht 2022, 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf, zuletzt geprüft am 20.03.2023.

UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2022c): Evaluation der Erfassung und Verwertung ausgewählter Abfallströme zur Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft, Texte | 31/2022, 2022. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/evaluation-der-erfassung-verwertung-ausgewaehlter, zuletzt geprüft am 24.02.2023.

UNEP - United Nations Environment Programme (2013): Costs of Inaction on the Sound Management of Chemicals, 2013. Online verfügbar unter https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8412, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

UNFCCC - United Nations Framework Congention on Climate Change (Hg.) (2013): Reporting of the LULUCF sector under the Convention, 2013. Online verfügbar unter https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/

land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf/reporting-of-the-lulucf-sector-by-parties-included-in-annex-i-to-the-convention, zuletzt geprüft am 04.04.2023.

Utfeld, A.; Kuhn, N. (2020): Planet e.: Fast Furniture, Wie billige Möbel kostbare Wälder vernichten. Weitere Beteiligte: Andreas Ewels. Volker Angres (Regie). Online verfügbar unter https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-fast-furniture-100.html, zuletzt geprüft am 07.03.2023.

VDI ZRE - VDI Zentrum Ressourceneffizienz (Hg.) (2017): Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 18, 2017. Online verfügbar unter https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_18_Remanufacturing_bf.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

VDZ (Hg.) (2020): Dekarbonisierung von Zement und Beton, Minderungspfade und Handlungsstrategien. Unter Mitarbeit von Schneider, M.; Behrouzi, D.; Fleiger, K.; Hoenig, V.; Hoppe, H. et al. VDZ. Düsseldorf, 2020. Online verfügbar unter https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

Verified Market Research (2021): OFF-THE-SHELF Second Hand Furniture Market Size And Forecast, Report ID: 77280. Verified Market Research (Hg.). Online verfügbar unter https://www.verifiedmarketresearch.com/product/off-the-shelf-second-hand-furniture-market/, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Wang, S.; Su, D.; Zhu, S. (2016): A Comparative Study on Life Cycle Assessment of Typical Wood base Furniture. In: Kim, Y. (Hg.): 5th International conference on sustainable energy and environmental engineering (ICSEEE 2016). Shuhai, China, 12-13 November 2016: part 1 of 2. 2016 5th International Conference on Sustainable Energy and Environment Engineering (ICSEEE 2016). Zhuhai, China, 11/12/2016 - 11/13/2016. International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering ICSEEE. Amsterdam: Atlantis Press (Advances in engineering research, volume 63).

WeiterGebenOrg.de (2019): wo landen Altmöbel? WeiterGebenOrg.de (Hg.). Online verfügbar unter https://weitergeben.org/wo-landen-altmoebel/, zuletzt geprüft am 22.02.2023.

Wenker, J. L.; Rüter, S. (2015): Ökobilanz-Daten für holzbasierte Möbel (Thünen Report 31). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn055528.pdf, zuletzt geprüft am 05.05.2023.

WHO (2020): WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000-2019. World Health Organization, Department for Data and Analytics. Genf, 2020.

Wiebe, K. S.; Harsdorff, M.; Montt, G.; Simas, M. S.; Wood, R. (2019): Global Circular Economy Scenario in a Multiregional Input-Output Framework. In: *Environmental Science & Technology* 53 (11), S. 6362–6373. DOI: 10.1021/acs.est.9b01208.

Wiek, A.; Binder, C.; Scholz, R. W. (2006): Functions of scenarios in transition processes. In: *Futures* 38 (7), S. 740–766. DOI: 10.1016/j.futures.2005.12.003.

Willett, W.; Rockström, J.; Loken, B.; Springmann, M.; Lang, T.; Vermeulen, S.; Garnett, T.; Tilman, D.; DeClerck, F.; Wood, A.; Jonell, M.; Clark, M.; Gordon, L. J. et al. (2019): Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. In: *Lancet (London, England)* 393 (10170), S. 447–492. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Wilting, H. C.; Schipper, A. M.; Bakkenes, M.; Meijer, J. R.; Huijbregts, M. 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.

World Bank Group (Hg.) (2021): Strengthening Sustainability in the Glass Industry, 2021.

WRAP (Hg.) (2021): Textiles 2030 Roadmap, 2021. Online verfügbar unter https://wrap.org.uk/resources/guide/textiles-2030-roadmap, zuletzt geprüft am 25.03.2023.

Wüst, S.; Schaltegger, S.; Wolff, F.; Lautermann, C.; Schöpflin, P. (2022): Konzeptioneller Rahmen zur Erforschung von unternehmensbezogenen Rebound-Effekten, Konzeptpapier im Rahmen des Projekts „Ganzheitliches Management von Energie- und Ressourceneffizienz in Unternehmen“ (MERU). Öko-Institut; Institut für ökologische Wirtschaftspolitik; Centre for Sustainability Management; Data Center Group; B.A.U.M. e.V.; gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2022. Online verfügbar unter https://www.meru-projekt.de/fileadmin/meru-projekt/user_upload/publikationen/Wuest_et_al_2022_-_MERU_Konzeptpapier_de.pdf, zuletzt geprüft am 10.03.2023.

WWF (Hg.) (2020): Positionspapier "Circular Economy", 2020. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Position-CircularEconomy.pdf, zuletzt geprüft am 21.03.23.

WWF Deutschland (2020): Es gibt auch kritische Stimmen. Wieso unterstützt der WWF das FSC-Siegel trotzdem? WWF Deutschland (Hg.). Online verfügbar unter https://www.wwf.de/themen-projekte/waelder/verantwortungsvollere-waldnutzung/wwf-und-fsc, zuletzt aktualisiert am 18.05.2020, zuletzt geprüft am 25.04.2023.

WWF Deutschland, Wuppertal-Institut (Hg.) (2021): Vom Flickenteppich zur echten Kreislaufwirtschaftsstrategie. Impulspapier., 2021. Online verfügbar unter https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWhttps://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Impulspapier-circular-economy.pdfF-Impulspapier-circular-economy.pdf, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

Zink, T.; Geyer, R. (2017): Circular Economy Rebound. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3), S. 593–602. DOI: 10.1111/jiec.12545.

ZVEI e.V. (2021): Servicefähige Leuchten, Langfassung. ZVEI e.V. Fachverband Licht (Hg.). Frankfurt am Main, 2021. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2021/Oktober/Informationspapier_Servicefaehige_Leuchten_Langfassung_Oktober_2021/Informationspapier_Servicefaehige_Leuchten_Langfassung_Oktober_2021.pdf, zuletzt geprüft am 21.02.2023.

Zweckverband Müllverwertung Schwandorf (2021): Preise, Anlieferungvon 100 kg oder mehr (Verwiegung). Zweckverband Müllverwertung Schwandorf (Hg.). Online verfügbar unter https://www.z-m-s.de/preise.html, zuletzt aktualisiert am 01.01.2021, zuletzt geprüft am 20.02.2023.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Schritte der Szenario-Entwicklung 20

Abbildung 3-2: Definition von Circular Economy und Darstellung der fünf Handlungsstrategien 22

Abbildung 3-3: Zusammenfassung MDCE-Szenarien 23

Abbildung 3-4: Beispiel eines Wirkmodells für die Maßnahme „Ecodesign“ im Sektor Möbel 30

Abbildung 3-5: Hybrides Modellsystem 32

Abbildung 3-6: Das Modell Deutschland Circular Economy 32

Abbildung 3-7: Übersicht Modell FORECAST Industry 36

Abbildung 3-8: Ansatz zur Bewertung biodiversitätsrelevanter Aspekte 39

Abbildung 3-9: Volkswirtschaftliche Kreislauflogik 41

Abbildung 3-10: Durchschnittliche Nachfrage von privaten Haushalten in Deutschland nach Konsumbereichen (arithmetisches Mittel 2019-2021) 42

Abbildung 3-11: Kenngröße Veränderungspotenzial und Fragestellungen 48

Abbildung 4-1: Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) in MDCE-Szenarien 54

Abbildung 4-2: Vergleich Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) – Status quo, Baseline- und Mix-Szenario (ohne und mit Rebound durch freiwerdendes Einkommen) 55

Abbildung 4-3: Veränderungen in den Treibhausgasemissionen (%) zwischen den MDCE-Szenarien 56

Abbildung 4-4: Entwicklung Emissionen nach Szenario in Mt CO_2-Äq (2018, 2045, NIR-kalibriert) 61

Abbildung 4-5: Entwicklung Endenergienachfrage nach Szenario in TWh (2018, 2045) 62

Abbildung 4-6: Rohstoffkonsum, RMC (Mt) in MDCE-Szenarien 63

Abbildung 4-7: Rohstoffkonsum, RMC (Mt) – Mix-Szenario (2045) 64

Abbildung 4-8: Rohstoffkonsum, RMC – Veränderungen (%) 65

Abbildung 4-9: Rohstoffkonsum, RMC – Gesamtübersicht 67

Abbildung 4-10: Rohstoffkonsum, RMC – Differenzierung nach biotischen und abiotischen Rohstoffen 68

Abbildung 4-11: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mt) in MDCE-Szenarien 69

Abbildung 4-12: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mt) – Mix-Szenario (2045) 70

Abbildung 4-13: Gesamter Materialaufwand, TMC – Veränderungen (%) 70

Abbildung 4-14: Gesamter Materialaufwand, TMC – Einsparungen je Sektor im Mix-Szenario 72

Abbildung 4-15: Gesamter Materialaufwand, TMC – Differenzierung nach biotischen und abiotischen Rohstoffen 73

Abbildung 4-16: Landnutzung (Mio. ha) in MDCE-Szenarien 74

Abbildung 4-17: Landnutzung (Mio. ha) – Mix-Szenario (2045) 74

Abbildung 4-18: Landnutzung – Veränderungen (%) 75

Abbildung 4-19: Landnutzung – Reduktionspotenziale je Sektor 77

Abbildung 4-20: Landnutzung – Differenzierung nach Flächennutzungsart 78

Abbildung 4-21: Vergleich der Szenarien – *Fahrzeuge und Batterien* 80

Abbildung 4-22: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien* 82

Abbildung 4-23: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien* 82

Abbildung 4-24: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien* 83

Abbildung 4-25: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Fahrzeuge und Batterien* 83

Abbildung 4-26: Vergleich der Szenarien – *Hochbau* 87

Abbildung 4-27: Vergleich der Szenarien – *Tiefbau* 88

Abbildung 4-28: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Hochbau* 91

Abbildung 4-29: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Tiefbau* 91

Abbildung 4-30: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Hochbau* 92

Abbildung 4-31: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Tiefbau* 92

Abbildung 4-32: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Hochbau* 93

Abbildung 4-33: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Tiefbau* 93

Abbildung 4-34: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Hochbau* 94

Abbildung 4-35: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Tiefbau* 94

Abbildung 4-36: Vergleich der Szenarien – *IKT und Haushaltsgeräte* 96

Abbildung 4-37: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte* 98

Abbildung 4-38: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte* 99

Abbildung 4-39: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte* 99

Abbildung 4-40: Landnutzung (Mix-Szenario) – *IKT und Haushaltsgeräte* 100

Abbildung 4-41: Vergleich der Szenarien – *Lebensmittel und Ernährung* 104

Abbildung 4-42: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Lebensmittel* 106

Abbildung 4-43: Ressourcennutzung, Fossil (Mix-Szenario) – *Lebensmittel* 107

Abbildung 4-44: Ressourcennutzung, Metalle und Mineralien (Mix-Szenario) – *Lebensmittel* 107

Abbildung 4-45: Landnutzung (Mix-Szenario) basierend auf Agribalyse – *Lebensmittel* 108

Abbildung 4-46: Fußabdruck des Biodiversitätsverlustpotenzials der verschiedenen Ernährungsweisen pro Person (BVI m^2a) 109

Abbildung 4-47: Vergleich der Szenarien nach Biodiversität in Biodiversitätsdifferenz (BVI m^2a) 110

Abbildung 4-48: Vergleich der Szenarien für die Indikatoren *THG* und *Landnutzung* mit zwei verschiedenen Datenbasis (Agribalyse & ecoinvent) 111

Abbildung 4-49: Vergleich der Szenarien – *Textilien* 113

Abbildung 4-50: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Textilien* 114

Abbildung 4-51: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Textilien* 115

Abbildung 4-52: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Textilien* 115

Abbildung 4-53: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Textilien* 116

Abbildung 4-54: Vergleich der Szenarien – *Möbel* 119

Abbildung 4-55: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Möbel* 121

Abbildung 4-56: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Möbel* 121

Abbildung 4-57: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Möbel* 122

Abbildung 4-58: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Möbel* 122

Abbildung 4-59: Vergleich der Szenarien – *Beleuchtung* 126

Abbildung 4-60: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – *Beleuchtung* 128

Abbildung 4-61: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – *Beleuchtung* 128

Abbildung 4-62: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – *Beleuchtung* 129

Abbildung 4-63: Landnutzung (Mix-Szenario) – *Beleuchtung* 129

Abbildung 4-64: Vergleich der Szenarien – Verpackungen 135

Abbildung 4-65: Treibhausgasemissionen (Mix-Szenario) – Verpackungen 136

Abbildung 4-66: Rohstoffkonsum, RMC (Mix-Szenario) – Verpackungen 137

Abbildung 4-67: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mix-Szenario) – Verpackungen 138

Abbildung 4-68: Landnutzung (Mix-Szenario) – Verpackungen 138

Abbildung 4-69: Gesamtveränderungspotenziale aller Sektoren im Mix-Szenario gegenüber der Baseline. 143

Abbildung 4-70: Für den Fahrzeugsektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 149

Abbildung 4-71: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Fahrzeugsektor (Mix-Szenario) 152

Abbildung 4-72: Für den Bausektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 153

Abbildung 4-73: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Bausektor (Mix-Szenario) 155

Abbildung 4-74: Für den Sektor IKT und Haushaltsgeräte relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 156

Abbildung 4-75: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Sektor IKT und Haushaltsgeräte (Mix-Szenario) 158

Abbildung 4-76: Für den Ernährungssektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 159

Abbildung 4-77: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Ernährungssektor (Mix-Szenario) 160

Abbildung 4-78: Für den Möbelsektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 161

Abbildung 4-79: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Möbelsektor (Mix-Szenario) 162

Abbildung 4-80: Für den Beleuchtungssektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 164

Abbildung 4-81: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Beleuchtungssektor (Mix-Szenario) 165

Abbildung 4-82: Für den Verpackungssektor relevante Rohstoffe (orange – kritisch gemäß EC und hohes Umweltgefährdungspotenzial, gelb – hohes Umweltgefährdungspotenzial) 166

Abbildung 4-83: Maßnahmenfeine Veränderungspotenziale im Verpackungssektor (Mix-Szenario) 167

Abbildung 4-84: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung in Mrd. € 169

Abbildung 4-85: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf in Mio. Vollzeitäquivalenten 169

Abbildung 4-86: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – absolut in Mrd. € ggü. Baseline 172

Abbildung 4-87: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen – Relative Änderung ggü. Baseline in % 173

Abbildung 4-88: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Gewinnen und Löhnen – absolut in Mrd. € 176

Abbildung 4-89: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundene Bruttowertschöpfung nach Gewinnen und Löhnen –anteilig in % 176

Abbildung 4-90: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Wirtschaftsbereichen – absolut in Mio. Vollzeitäquivalenten 177

Abbildung 4-91: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Wirtschaftsbereichen – Relative Änderung ggü. Baseline in % 179

Abbildung 4-92: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Geschlecht – absolut in Mio. Vollzeitäquivalenten (obere Abbildung) und anteilig in % (untere Abbildung) 180

Abbildung 4-93: Mit Nachfrage in MDCE-Szenarien verbundener Arbeitskräftebedarf nach Qualifikationsniveau – absolut in Mio. Vollzeitäquivalenten (obere Abbildung) und anteilig in % (untere Abbildung) 181

Abbildung 4-94: Ergebnis Umweltkosten durch direkte THG-Emissionen ohne und mit Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen 2045 182

Abbildung 4-95: Monetäre Bewertung anthropogener THG-Emissionen durch veränderte Landnutzung ohne Lebensmittel – Potenzial 2045 ohne und mit Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen 183

Abbildung 4-96: Treiber des Biodiversitätsverlusts 187

Abbildung 4-97: Externe Kosten des Verkehrs in Europa 189

Abbildung 7-1: Reihenfolge der betrachteten Maßnahmen in Bezug auf die Entwicklung der Neuzulassungen zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen 236

Abbildung 7-2: Smart Circular Bridge (Almere) 243

Abbildung 7-3: Trendextrapolation der Konsumausgaben für Bekleidung in Deutschland bis 2045 274

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Kurzbeschreibung der Entwicklung der einzelnen Schlüsseltreibern in den vier MDCE-Szenarien 24

Tabelle 3-2: CE-Maßnahmen für die Modellierung in den ausgewählten Sektoren 25

Tabelle 3-3: Betrachtete Treibhausgase und entsprechende GWP_{100}-Faktoren 26

Tabelle 3-4: Zusammenhänge zwischen Circular Economy- und Kritikalitätskonzepten 46

Tabelle 3-5: Katalog betrachteter Rohstoffe 47

Tabelle 3-6: Kostensatz zur Bewertung von Klimaschäden 51

Tabelle 3-7: Kostensatz zur Bewertung von Klimaschäden durch Änderung der Landnutzung 52

Tabelle 4-1: Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) in den einzelnen Sektoren in den MDCE-Szenarien (inkl. Rebound-Effekt durch freiwerdendes Einkommen) 56

Tabelle 4-2: Einsparungen der Treibhausgasemissionen (Mt CO_2-Äq) in den einzelnen Sektoren in den MDCE-Szenarien im Vergleich zur Baseline (2045), ohne Rebound-Effekte 57

Tabelle 4-3: Veränderungen der Treibhausgasemissionen (%) in den einzelnen Sektoren in den MDCE-Szenarien im Vergleich zum Baseline (2045), ohne Rebound-Effekte 58

Tabelle 4-4: NIR kalibrierte Emissionen Industriesektor (Mt CO_2-Äq) nach Szenario und Quelle 60

Tabelle 4-5: Rohstoffkonsum RMC (Mt) in MDCE-Szenarien 65

Tabelle 4-6: Rohstoffkonsum RMC in MDCE-Szenarien – Einsparungen (Mt) 66

Tabelle 4-7: Rohstoffkonsum RMC in MDCE-Szenarien – Veränderungen (%) 66

Tabelle 4-8: Gesamter Materialaufwand, TMC (Mt) in MDCE-Szenarien 71

Tabelle 4-9: Gesamter Materialaufwand, TMC – Veränderungen (%) 71

Tabelle 4-10: Landnutzung (Mio. ha) in MDCE Szenarien 76

Tabelle 4-11: Landnutzung in MDCE Szenarien – Einsparungen (Mio. ha) 76

Tabelle 4-12: Landnutzung (Mio. ha) in MDCE Szenarien – Veränderungen (%) 77

Tabelle 4-13: CE-Maßnahmen Verpackungen 136

Tabelle 4-14: Rohstoffe mit den größten Veränderungen in der Versorgungslage (Anspannung oben, Entspannung unten) in der Baseline in 2045 im Vergleich mit heute (Status quo) 142

Tabelle 4-15: Liste der betrachteten Rohstoffe mit Bewertung 145

Tabelle 4-16: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Fahrzeugsektor 150

Tabelle 4-17: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Bausektor 153

Tabelle 4-18: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Sektor IKT und Haushaltsgeräte 157

Tabelle 4-19: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Ernährungssektor 160

Tabelle 4-20: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Möbelsektor 162

Tabelle 4-21: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Beleuchtungssektor 164

Tabelle 4-22: Veränderungspotenziale über ± 5 % der Szenarien im Verpackungssektor 167

Tabelle 4-23: Vergleich der monetarisierten THG-Emissionen aus direkter Emission und veränderter Landnutzung ohne Lebensmittel und Rebound-Effekte 184

Tabelle 7-1: R-Strategien 231

Tabelle 7-2: CE-Maßnahmen Fahrzeuge und Batterien 232

Tabelle 7-3: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Fahrzeuge und Batterien) 233

Tabelle 7-4: Neuzulassungen in Mio. Fahrzeuge 236

Tabelle 7-5: Bestände in Mio. Fahrzeuge 236

Tabelle 7-6: CE-Maßnahmen Hoch- und Tiefbau 241

Tabelle 7-7: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Hoch- und Tiefbau) 243

Tabelle 7-8: Parametrisierung der Modellinputs im Hochbau 246

Tabelle 7-9: Parametrisierung der Modellinputs im Tiefbau 247

Tabelle 7-10: CE-Maßnahmen IKT & Haushaltsgeräte 249

Tabelle 7-11: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (IKT & Haushaltsgeräte) 250

Tabelle 7-12: Aktuelle und erwartbare Lebens- und Nutzungsdauer (in Jahren) 252

Tabelle 7-13: Häufigkeit der Reparatur von Komponenten (in % im Laufe der angenommenen Lebens- und Nutzungsdauer) 253

Tabelle 7-14: Herstellungsaufwand, Energieverbrauch & Anschaffungskosten – IKT und Haushaltsgeräte 254

Tabelle 7-15: Jährliche Reparaturkosten für die Modellierung von IKT- und Haushaltsgeräten 254

Tabelle 7-16: Zentrale Modellierungsparameter für Remanufacturing im Bereich IKT und Haushaltsgeräte in Deutschland 255

Tabelle 7-17: Annahmen für die Modellierung der verbesserten Sammlung und erhöhten Rückgewinnung von Rohstoffen 255

Tabelle 7-18: Modellierungsparameter für Rechenzentren 256

Tabelle 7-19: Konsummenge der vier Ernährungsweisen pro Kopf und Jahr (kg) 258

Tabelle 7-20: Lebensmittelverluste der Wertschöpfungsstufen in % 260

Tabelle 7-21: CE-Maßnahmen Lebensmittel und Landwirtschaft 262

Tabelle 7-22: Mio. Personen je Ernährungsweise im Zeitraum 2020-2045, um eine Reduzierung des Fleischkonsums von 1,3 % zu erreichen 264

Tabelle 7-23: Fleischkonsum Deutschlands je Ernährungsweise in Mt ohne Lebensmittelverluste 264

Tabelle 7-24: Mio. Personen je Ernährungsweise im Zeitraum 2020-2045, um einen Eat-Lancet konformen Fleischkonsum in Deutschland zu erreichen 266

Tabelle 7-25: Zuwachs der fleischreduzierten, in vitro, vegetarischen und veganen Ernährungsweisen in Personen bis 2045 267

Tabelle 7-26: In-vitro-Fleisch Sachbilanz 268

Tabelle 7-27: CE-Maßnahmen Textilien 269

Tabelle 7-28: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Textilien) 272

Tabelle 7-29: Vereinfachte Materialzusammensetzung von Bekleidungstextilien 275

Tabelle 7-30: CE-Maßnahmen Möbel 277

Tabelle 7-31: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Möbel) 279

Tabelle 7-32: Jährliche Wachstumsraten Möbel und Second-Hand-Möbelmarkt 280

Tabelle 7-33: Marktdaten für Neu- und Second-Hand-Möbel-Konsum in Deutschland pro Jahr 281

Tabelle 7-34: Annahmen zur MDCE-Maßnahme „Ökodesign“ bei Möbeln 282

Tabelle 7-35: Vereinfachte Materialzusammensetzung von Möbeln im Schnitt 283

Tabelle 7-36: Rezyklateinsatzquoten und Materialänderungen in den Szenarien 284

Tabelle 7-37: CE-Maßnahmen Beleuchtung 284

Tabelle 7-38: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Beleuchtung) 285

Tabelle 7-39: Annahmen bzgl. Lampenmengen und Stückzahl für Berechnungen 290

Tabelle 7-40: Annahmen bzgl. durchschnittlicher Materialfraktionen für GEL und LED-Lampen 291

Tabelle 7-41: Übersicht angenommenen Änderungen Materialströme in Szenarien 294

Tabelle 7-42: CE-Maßnahmen Verpackungen 296

Tabelle 7-43: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Verpackungen) 297

Tabelle 7-44: Reduktion der Materialmengen in den einzelnen Szenarien im Sektor Verpackungen 298

Tabelle 7-45: Bilanzansätze zum Einsatz von Post Consumer Rezyklaten aus werkstofflichem Verpackungsrecycling bei der Produktion von Verpackungen 299

Tabelle 7-46: Reduktion der Materialmengen für Verpackungen durch verhaltensbedingte Maßnahmen in Tsd. Tonnen 299

Tabelle 7-47: Reduktion der Materialmengen für Verpackungen durch technikbedingte Maßnahmen in Tsd. Tonnen 300

Tabelle 7-48: Bilanzansätze der Recyclingraten der einzelnen Verpackungsmaterialien 301

Tabelle 7-49: Durch das mechanische Verpackungsrecycling zur Verfügung gestellte Rezyklatmengen 301

Tabelle 7-50: Ausgewählte Indikatoren aus dem Projektionsbericht 2021 307

Abkürzungsverzeichnis

Abk	Abkürzung
°C	Grad Celsius
€	Euro
B2B	Business to Business
B2C	Business to Consumer
BEV	Battery Electric Vehicle (batteriebetriebene Elektrofahrzeuge)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BVI	Biodiversity Value Increment
CCS	Carbon Capture and Storage (CO_2-Abscheidung und Speicherung)
CCU/S	Carbon Capture Utilization and Storage
CE	Circular Economy; auch in „CE-Maßnahme”
CH_4	Methan
CO_2	Kohlendioxid
CO_2-Äq	CO_2-Äquivalente
DRI	Direct reduced iron (direkt reduziertes Eisen)
EE	Environmental extensions (Umwelterweiterungen)
EE-MRIO	Environmentally Extended Multi-Regional Input Output (Modell)
EoL	End of Life
EU	Europäische Union
EEV	Endenergienachfrage
EV	Electric Vehicle (Elektrisch betriebenes Fahrzeug)
F2F	Faser zu Faser (in Bezug auf Recycling)
GEL / NGEL	Gasentladungslampe
GWP	Global Warming Potenzial (Treibhauspotenzial)
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
HFC	Fluorkohlenwasserstoffe
HH	Haushalt(e)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
kt	Kilotonne(n)
LED	Light Emitting Diode (Leuchtdiode)
LCA / LCIA	Life Cycle Assessment / Life Cycle Impact Assessment (Ökobilanzierung)
LCI	Life Cycle Inventory
MDCE	Modell Deutschland Circular Economy (Name der Studie)
MFA	Material Flow Analysis (Materialflussmodell)
Mha	Millionen Hektar
Mio.	Millionen
Mrd.	Milliarden
Mt	Millionen Tonnen
MRIO	*Siehe EE-MRIO*

Abk	Abkürzung
NIR	Nationaler Inventarbericht (engl.: National Inventory Report)
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickstoffoxide
NZL	Neuzulassungen
O_3	Ozon
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
PaaS	Product-as-a-Service
PFC	Perfluorochemicals (Perfluorierte Chemikalien)
PHD	Planetary Health Diet
PKW	Personenkraftwagen
PUE	Power Usage Effectiveness
RMC	Raw Material Consumption (Rohstoffkonsum)
SF_6	Schwefelhexafluorid
SO_x	Schwefeloxide
SUV	Sport Utility Vehicle
t	Tonne(n)
t/a	Tonnen pro Jahr
THG	Treibhausgase
TMC	Total Material Consumption (Gesamter Materialaufwand)
TWh	Terrawattstunde
USD	U.S. Dollars
VP	Veränderungspotenzial
VZÄ	Vollzeitäquivalent

7 Anhang

7.1 R-Strategien

Tabelle 7-1: R-Strategien

Intelligente Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur	
1. Refuse	**Überflüssig machen.** Produkte werden überflüssig, der Produktnutzen wird anders erbracht
2. Rethink	**Neu denken und zirkulär designen.** Produkte neu gestalten und intensiver nutzen, z.B. durch Teilen
3. Reduce	**Reduzieren.** Steigerung der Effizienz bei der Produktherstellung oder -nutzung durch geringeren Verbrauch von natürlichen Ressourcen und Materialien
Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur	
4. Reuse	**Wiederverwendung.** Funktionsfähige Produkte wiederverwenden.
5. Repair	**Reparatur.** Produkte warten und durch Reparatur weiternutzen
6. Refurbish	**Verbessern.** Alte Produkte aufarbeiten und auf den neuesten Stand bringen
7. Remanufacture	**Wiederaufbereiten.** Teile aus defekten Produkten für neue Produkte nutzen, die dieselben Funktionen erfüllen
8. Repurpose	**Anders weiternutzen.** Teile aus defekten Produkten für neue Produkte nutzen, die andere Funktionen erfüllen
Wiederverwerten von Materialien	
9. Recycle	**Recycling.** Aufbereiten von Materialien, um eine hohe Qualität zu erhalten und sie wieder in den Materialkreislauf zurückzuführen
10. Recover	**Thermische Verwertung** mit Energierückgewinnung

Quelle: NKWS Österreich: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/strategie.html

7.2 Sektorspezifische Modellierungsparameter

In diesem Teil des Anhangs folgen die Detailangaben zur Modellierung der einzelnen Sektoren. Dabei werden die modellierten CE-Maßnahmen vorgestellt, Änderungen der Maßnahmen gegenüber der Machbarkeitsstudie und die Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien begründet. Im Rahmen der Modellierung wurde eine Vielzahl an Daten erhoben und viele Annahmen wurden getroffen. Eine vollständige Darstellung aller Datenparameter und Annahmen ist nicht möglich. Nichtsdestotrotz werden die wichtigsten Modellierungsdaten und Annahmen, die einen wesentlichen Einfluss auf die Modellierungsergebnisse haben, zusammenfassend und teilweise beispielhaft dargestellt.

7.2.1 Fahrzeuge und Batterien

CE-Maßnahmen und deren Ausprägung in den Szenarien

Tabelle 7-2: CE-Maßnahmen Fahrzeuge und Batterien

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1a	ÖPV ersetzt Individualverkehr	Es wird angenommen, dass Menschen einen bestimmten Anteil ihrer PKW-Fahrten durch ÖPV-Fahrten ersetzen. Dies könnte auch zur Reduktion von PKWs und dem Ausbau von ÖPV führen.	Rethink
1b	Car-Sharing ersetzt Individualverkehr	Es wird angenommen, dass Menschen einen bestimmten Anteil ihrer PKW-Fahrten mit Car-Sharing-Fahrten ersetzen. Dies könnte auch zur Reduktion von PKWs führen und dem Ausbau von Car-Sharing-Angeboten.	Rethink
1c	Ride-Pooling ersetzt Individualverkehr	Es wird angenommen, dass Menschen einen bestimmten Anteil ihrer PKW-Fahrten mit Ride-Pooling-Fahrten ersetzen. Dies könnte auch zur Reduktion von PKWs führen und dem Ausbau von Ride-Pooling-Angeboten	Rethink
2a	Reduktion der PKW-Größe	Es wird angenommen, dass eine Segmentverschiebung von großen zu kleineren Pkws stattfindet. Das geringere Gewicht von kleineren PKWs senkt den Energieaufwand bei der Herstellung und den Energieverbrauch für den Betrieb des PKWs.	Reduce
2b	Verlängerung der Nutzungsdauer	Die Lebensdauer von PKWs verlängert sich aufgrund von Verhaltensanpassungen, regelmäßiger Wartung und langlebigem Design/langlebiger Materialien	Rethink
2c	End of life-Recyclingrate erhöhen (PKW exklusive Batterie)	Seit 2015 ist vorgeschrieben, dass 95 % Masseanteil zurückgewonnen bzw. recycelt werden muss. Eine signifikante Steigerung der massenbezogenen Recyclingquote ist daher nicht möglich. Eine Vermeidung des Exports von Gebrauchtfahrzeugen zur Steigerung des Recyclings erscheint nicht ökologisch sinnvoll, da diese noch genutzt werden können. Die Steigerung der End of Life-Recyclingrate wird daher im Wesentlichen durch die Vermeidung des illegalen Exports von AFZ und der nicht anerkannten Verwertung erreicht.	Recycle
2d	Wiederverwendung von Komponenten	Altkomponenten aus PKWs werden ausgebaut, wiederaufbereitet (geputzt, teilweise neue Software, etc.) und wieder eingebaut. Dies ermöglicht eine Reduktion des Bedarfs an Primärmaterialien. Es wird angenommen, dass das Demontagepotenzial je nach Szenario voll/teilweise ausgeschöpft wird, indem nicht anerkannte Demontage und illegale Exporte verhindert werden.	Reuse, Remanufacture
3a	Reduktion der Batteriekapazität	Die Batteriekapazität wird an typisch gefahrene Distanzen (zwischen Pausen) angepasst, Abdeckung von bspw. 80 % der bisher getätigten Fahrten.	Reduce
3b	Langlebiges Design der Fahrzeugbatterie	Batterien werden so designt, dass sie für eine sehr lange Nutzungsdauer geeignet sind. Die Nutzungsdauer verlängert sich dadurch um eine bestimmte Zeitspanne abhängig vom Szenario.	Rethink
3c	End of life-Recyclingrate erhöhen (PKW-Batterie)	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.	Rethink
3d	Repurpose der PKW-Batterien	PKW-Batterien werden im Anschluss an die Nutzung im PKW als stationäre Energiespeicher verwendet	Repurpose

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Auf Basis der Experteneinschätzungen innerhalb des Projektteams und seitens der interviewten externen Expert*innen wurden einigen der in der Vorstudie identifizierten Maßnahmen ein eher geringes Potenzial zugeschrieben. Diese Maßnahmen wurden nicht weiter vertieft, um die verfügbaren Kapazitäten auf die Maßnahmen zu fokussieren, von denen nach Experteneinschätzung ein großes Potenzial erwartet wurde. Dies betrifft die Maßnahmen "Verbesserung der Ausbeute bei der Herstellung" und "Umleitung von Fabrikationsschrott". Bei beiden ist davon auszugehen, dass die jeweiligen Prozesse innerhalb der deutschen Fahrzeugindustrie schon in hohem Maße optimiert sind und es – im Vergleich zu anderen Bereichen – nur noch geringe Maßnahmen zur Effizienzsteigerung gibt. Ebenfalls nicht weiter berücksichtigt wurde die Maßnahme "Materialsubstitution". Zwar können durch die Substitution von Stahl mit Aluminium oder Verbundwerkstoffen leichtere Fahrzeuggewichte erzielt und dadurch mit dem Treibstoffverbrauch verbundene Treibhausgasemissionen eingespart werden. Jedoch handelt es sich nicht um eine Circular Economy Maßnahme, da hier nicht mit einem nachwachsenden (somit zirkulären) Material substituiert wird und somit auch keine nichtnachwachsenden Materialien eingespart werden. Stattdessen wird die Zirkularität ggf. sogar verringert, da sich Verbundwerkstoffe deutlich schlechter recyceln lassen als Metalle. Folglich ist diese Maßnahme zwar für den Umwelt- und Klimaschutz interessant, aber nicht Gegenstand dieser auf CE-Maßnahmen fokussierenden Studie. Die Maßnahme "Closed-Loop-Recycling" wurde durch die Maßnahme "End of Life-Recyclingrate erhöhen (PKW exklusive Batterie)" ersetzt. Es wurden vier Batterie-spezifische Maßnahmen in den Sektor Fahrzeuge mit aufgenommen: Langlebiges Design der Fahrzeugbatterie, Reduktion der Batteriekapazität, Repurpose der PKW-Batterie und End of Life-Recyclingrate erhöhen. Zusätzlich zu einer gesteigerten Nutzung von Car-Sharing und Ride-Pooling als Ersatz von Individualverkehr wurde eine gesteigerte ÖPV-Nutzung aufgenommen.

Tabelle 7-3: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Fahrzeuge und Batterien)

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
1a	ÖPV ersetzt Individualverkehr	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten
1b	Car-Sharing ersetzt Individualverkehr	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten
1c	Ride-Pooling ersetzt Individualverkehr	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten
2a	Reduktion der PKW-Größe	nein	nein	stark	stark	Konsumverhalten
2b	Verlängerung der Nutzungsdauer	schwach	stark	mittel	sehr stark	Konsumverhalten, technologischer Fortschritt, Politik Produktion
2c	End of life-Recycling-Rate erhöhen (PKW exklusive Batterie)	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten, Politik Konsument*innen
2d	Wiederverwendung von Komponenten	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten, Politik Konsument*innen
3a	Reduktion der Batteriekapazität	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten
3b	Langlebiges Design der Fahrzeugbatterie	schwach	stark	mittel	sehr stark	Konsumverhalten, technologischer Fortschritt
3c	End of life-Recyclingrate erhöhen (PKW-Batterie)	schwach	mittel	mittel	stark	technologischer Fortschritt, Politik Produktion

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
3d	Repurpose der PKW-Batterien	schwach	mittel	mittel	stark	technologischer Fortschritt, Politik Produktion, Politik Konsumentin*innen

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Begründung der Ausprägung

ÖPV/Car-Sharing/Ride-Pooling ersetzt Individualverkehr: Es wird angenommen, dass für den Ersatz von PKW-Fahrten durch ÖPV-Fahrten eine starke Verhaltensänderung der Konsument*innen notwendig ist. Denn die notwendigen Technologien sind heute schon marktreif. Daher ist diese Maßnahme im Verhalten- und im Mix-Szenario stark ausgeprägt, in der Baseline und im Technologie-Szenario nur schwach. Die Grundlogik der Maßnahmen "Car-Sharing/Ride-Pooling ersetzt PKW-Fahrten" ist analog.

Reduktion der PKW-Größe: Die Bereitschaft, einen kleineren PKW zu fahren, wird durch eine starke Verhaltensänderung seitens der Konsument*innen getrieben. Daraus folgt eine starke Ausprägung im Verhalten- und Mix-Szenario. Im Technologie-Szenario und in der Baseline wird die Maßnahme nicht umgesetzt.

Langlebiges Design der Fahrzeugbatterie: Eine längere Lebensdauer der Fahrzeugbatterie wird wesentlich durch eine Verbesserung der Produktionsprozesse, Optimierung der eingesetzten Materialien und des Batteriedesigns erreicht. Darüber hinaus hat das Nutzungsverhalten entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer einer Batterie, weshalb auch die Sensibilisierung und das Bewusstsein der Fahrzeughalter*innen Einfluss hat. Daher ist die Maßnahme im Mix-Szenario am stärksten ausgeprägt, es folgen abschwächend das Technologie-Szenario, das Verhalten-Szenario und die Baseline.

Verlängerung der Nutzungsdauer: Es wird angenommen, dass sich diese Maßnahme stark an der Lebensdauer der Batterie orientiert (technischer Fortschritt). Dies wird auch durch produktionsseitige Politikmaßnahmen getrieben. Darüber hinaus sind Verhaltensanpassungen, d.h. die Bereitschaft, ein Auto länger zu nutzen, durch die Konsument*innen notwendig. Daraus folgt eine sehr starke Ausprägung der Maßnahme im Mix-Szenario, eine starke im Technologie-Szenario, eine mittlere im Verhalten-Szenario und eine schwache in der Baseline.

End of Life-Recyclingrate erhöhen (PKW exklusive Batterie): Es wird angenommen, dass das Recycling technologisch ausgereift ist. Eine weitere Steigerung der End of Life-Recyclingrate ist eher durch Verhaltensanpassungen zu erreichen, um das Demontagepotenzial voll auszuschöpfen. Dies kann durch die Optimierung der Sammlung ermöglicht werden. Diese Maßnahme wird daher durch Verhaltensänderungen getrieben. Daher ist die Maßnahme im Verhalten- und im Mix-Szenario stark ausgeprägt, im Technologie-Szenario und in der Baseline schwach.

Reduktion der Batteriekapazität: Die Maßnahme setzt zwar auch die technische Umsetzung von Batterien mit reduzierter Kapazität voraus, sie wird aber im Wesentlichen durch Verhaltensanpassungen der Konsument*innen getrieben. Die Konsument*innen sind bereit, geringere Kapazitäten der Batterien und als Folge kürzere Fahrzeugreichweiten zu akzeptieren, da dies in der Regel in der alltäglichen Nutzung ausreicht. Daher ist die Maßnahme im Verhalten- und im Mix-Szenario stark ausgeprägt, im Technologie-Szenario und der Baseline nur schwach.

End of Life-Recyclingrate erhöhen (PKW-Batterie): Die Maßnahme nimmt eine technische Weiterentwicklung vorhandener Recyclingverfahren und optimierte Prozessabläufe an, welche zu erhöhten Rückgewinnungsraten führt. Darüber hinaus ist die Sammelrate ein wichtiger Faktor, welcher entscheidend dafür ist wie viele Batterien dem Recycling (in Deutschland) überhaupt zur Verfügung stehen. Entscheidend sind hier die rechtlichen Rahmenbedingungen, das Verhalten der Endnutzer*innen aber auch die Angebote der Fahrzeughersteller. Denkbar wäre, dass Fahrzeugbatterien nur geleast bzw. geliehen werden, dass es Rücknahmepflichten für die Hersteller gibt oder dass durch Pfandsysteme und Herstellergarantien Anreize für die Endnutzer*innen geschaffen werden. Dementsprechend ist die Maßnahme im Verhalten- und im Technologie-Szenario mittel ausgeprägt, stark im Mix-Szenario und in der Baseline nur schwach.

Repurpose der PKW-Batterien: In dieser Maßnahme spielt die technische Weiterentwicklung, aber auch das Verhalten der Konsument*innen eine entscheidende Rolle. Zum einen müssen die technischen Voraussetzungen für ein reibungsloses Sammeln, Testen und Umfunktionieren großer Mengen unterschiedlicher Typen von Fahrzeugbatterien geschaffen sein. Zum anderen ist die Akzeptanz und Bereitschaft der Konsumenten*innen bereits genutzte alte Batterien weiter zu verwenden Grundlage zur Schaffung eines Marktes für Second Life-Batterien. Folglich ist die Maßnahme im Verhalten- und im Technologie-Szenario mittel ausgeprägt, stark im Mix-Szenario und in der Baseline nur schwach.

Wiederverwendung von Komponenten: Es wird angenommen, dass die Maßnahme am wesentlichsten durch Verhaltensänderungen getrieben ist. Diese bewirken, dass das Demontagepotenzial stärker ausgeschöpft werden kann, indem Kundenvorbehalte gegenüber aufgearbeiteten Altteilen abgebaut werden und die Sammlung optimiert wird. Daher ist die Maßnahme im Verhalten- und Mix-Szenario stark ausgeprägt, im Technologie-Szenario und in der Baseline schwach.

Modellierungsdaten und Annahmen

Grundlegende Annahmen

Die Maßnahmen im Sektor Fahrzeuge beziehen sich i.d.R. ausschließlich auf PKW. Das Baseline-Szenario orientiert sich in der Entwicklung am Projektionsbericht 2021. Da dieser den Zeithorizont 2040 hat, wurden zudem die Szenarien aus der Rescue Studie herangezogen (Zeithorizont bis 2050). Es wird angenommen, dass ab 2035 keine Elektroautos mehr zugelassen werden. Die Verfügbarkeit von Altfahrzeugen für Recycling oder Remanufacturing entspricht der Verteilung der Neuzulassungen im Jahr 2035; es wird also eine Nutzungsdauer von 10 Jahren angenommen. Bis 2045 werden Batterien effizienter und haben eine Standardreichweite von 500 km.

Entwicklung der Neuzulassungen und Fahrzeugbestände bis 2045

Zur Ermittlung der Neuzulassungen und Fahrzeugbestände bis 2045 wurden die Daten des Projektionsberichts für 2040 anhand der Zeitscheiben der Rescue Studien (2040, 2050) (Günther et al. 2018) exponentiell fortschrieben. Hierzu wurden die Daten der GreenE1/GreenE2/GreenMe Szenarien verwendet, da sie ähnliche Gesamtmengen für die Neuzulassungen und Bestände in 2040 wie der Projektionsbericht annehmen und in ihrer Beschreibung übereinstimmen. Der Vorteil dieser Rescueszenarien ist zudem ein ambitionierterer Aufschwung der Elektrofahrzeuge. Für die Maßnahmen im Bereich Recycling, Remanufacturing und Second Life der Fahrzeugbatterien wurden zudem Bestände und Neuzulassungen für 2035 ermittelt. Vorgehen analog wie für 2045. Es werden vereinfacht nur Elektroaustos und Verbrenner unterschieden, da die Rescue Studien keine weitere Aufteilung in Benzin und Diesel vornehmen.

Tabelle 7-4: Neuzulassungen in Mio. Fahrzeuge

Fahrzeugtyp	2030	2035	2040	2045	2050
Verbrenner	1,9	1,67	0	0	0
EV	1,25	1,10	2,5	2,24	2
Summe	3,15	2,77	2,5	2,24	2

Die Zahlen für 2030, 2040, 2050 stammen aus der Rescue Studie und entsprechen den GreenE1/GreenE2/GreenMe. Die Zahlen für 2035 und 2045 wurden durch Extrapolatin ermittelt.

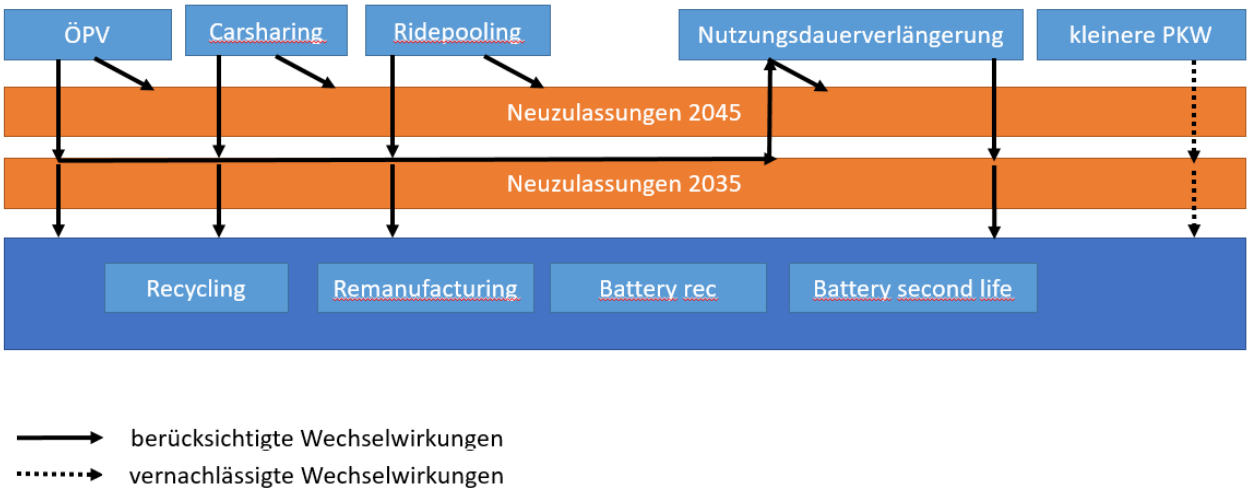
Tabelle 7-5: Bestände in Mio. Fahrzeuge

Fahrzeugtyp	2030	2035	2040	2045	2050
Verbrenner	40	39,58	22	20,55	6
EV	8	7,92	25	23,35	35
Summe	48	47,50	47	43,90	41

Die Zahlen für 2030, 2040, 2050 stammen aus der Rescue Studie und entsprechen den GreenE1/GreenE2/GreenMe. Die Zahlen für 2035 und 2045 wurden durch Extrapolatin ermittelt.

Um die Gesamtwirkung aller Maßnahmen im Bündel ermitteln zu können, wurde eine sukzessive Veränderung der Neuzulassungen durch die Umsetzung bestimmter Maßnahmen ermittelt (siehe Abbildung 7-1). Hierzu wurde angenommen, dass die Maßnahmen mit Einfluss auf die Neuzulassungen in folgender Reihenfolge umgesetzt werden: Zunächst ÖPV, Car-Sharing und Ride-Pooling, anschließend Nutzungsverlängerung und schlussendlich kleinere PKWs. Hierbei wurde der Einfluss kleinerer PKWs auf die Neuzulassungen vernachlässigt.

Abbildung 7-1: Reihenfolge der betrachteten Maßnahmen in Bezug auf die Entwicklung der Neuzulassungen zur Berücksichtigung von Wechselwirkungen



Quelle: Eigene Darstellung

PKW-spezifische Annahmen

Der durchschnittliche Preis für eine Neuanschaffung je Fahrzeug beträgt 27.310 € (Datenpunkt 2015, Statista)[37]. Der durchschnittliche Besetzungsgrad pro PKW beträgt 1,5, die durchschnittliche Anzahl PKW pro Haushalt beträgt 1,04 (BMDV).. Die durchschnittliche Jahresfahrleistung je PKW umfasst 13.323 km (KBA 2021). Die Gesamtkosten je Fahrzeug in Abhängigkeit von der durchschnittlichen Fahrleistung betragen 5.538 € für das Jahr 2015 (Stadtmobil 2023). Annahmen bzgl. Sprit- und Strompreisen wurden mithilfe von Daten aus Statista getroffen: 1,74 €/Liter und 0,379 €/kWh (2015).

Maßnahmenspezifische Annahmen

ÖPV, Car-Sharing und Ride-Pooling

In diesen drei Maßnahmen wird angenommen, dass ein bestimmter Anteil der PKW-Fahrten jeweils durch ÖPV, Car-Sharing bzw. Ride-Pooling ersetzt wird. Die Annahmen für die resultierende Veränderung der Neuzulassungen (NZL) orientieren sich an den Rescue-Studien (Günther et al. 2018; Günther et al. 2020). Das GreenLife- bzw. das GreenSupreme-Szenario nimmt eine starke Verhaltensänderung im Mobilitätsverhalten an und wird daher für die Annahmen im Verhalten- bzw. Mix-Szenario genutzt (NZL sinken bis 2045 um jeweils 0.6 Mio. PKW je Maßnahme). Das GreenLate-Szenario nimmt eine mittlere Änderung des Mobilitätsverhaltens an und wird daher für das Technologie-Szenario und die Baseline verwendet (NZL sinken bis 2045 um jeweils 0.03 Mio. PKW je Maßnahme). In diesen drei Maßnahmen wird angenommen, dass ein bestimmter Anteil der PKW-Fahrten jeweils durch ÖPV, Car-Sharing bzw. Ride-Pooling ersetzt wird. Die Annahmen für die resultierende Veränderung der Neuzulassungen orientieren sich an den Rescue-Studien (Günther et al. 2018; Günther et al. 2020). Das GreenLife- bzw. das GreenSupreme-Szenario nimmt eine starke Verhaltensänderung im Mobilitätsverhalten an und wird daher für die Annahmen im Verhalten- bzw. Mix-Szenario genutzt (NZL sinken bis 2045 um jeweils 0.6 Mio. PKW je Maßnahme). Das GreenLate-Szenario nimmt eine mittlere Änderung des Mobilitätsverhaltens an und wird daher für das Technologie-Szenario und die Baseline verwendet (NZL sinken bis 2045 um jeweils 0.03 Mio. PKW je Maßnahme).

ÖPV: Es wurde angenommen, dass die Kosten pro Jahr für ÖPV pro Person 1046 € betragen (diskontiert auf 2015). Dafür wurde die Einführung des 49 €-Tickets zugrunde gelegt, um den Fernverkehr miteinzubeziehen wurde der Ticketpreis des 49 €-Tickets verdoppelt. Der Ausbau der Infrastruktur wurde mithilfe des ASTRA Modells abgeschätzt und betrug ca. 0,12 € pro pkm (TRT; M Five; Fraunhofer ISI 2021).

Car-Sharing: Die Kosten für Car-Sharing pro Jahr wurden mit Daten von stadmotbil.de abgeschätzt abhängig von der Jahresfahrleistung, sie betragen im Jahr 2015 5.497 € (Stadtmobil 2023). Es wurden keine Daten gefunden, um die Ausgaben für den Zuwachs des Car-Sharing-Angebots abschätzen zu können.

Ride-Pooling: Der Besetzungsgrad pro Ride-Pooling-Fahrt wird mit 2 angenommen (Ennen und Heilker 2020). Die Kosten für Ride-Pooling wurden näherungsweise anhand der Kosten für Car-Sharing abgeschätzt, indem die Kosten aufgrund des höheren Besetzungsgrades runterskaliert wurden (Faktor 1,5/2). **Ride-Pooling**: Der Besetzungsgrad pro Ride-pooling-Fahrt wird mit 2 angenommen (Ennen und Heilker 2020). Die Kosten für Ride-Pooling wurden näherungsweise anhand der

[37] Da das MRIO Modell mit Daten von 2015 rechnet, wurden alle Preise auf 2015 runtergerechnet.

Kosten für Car-Sharing abgeschätzt, indem die Kosten aufgrund des höheren Besetzungsgrades herunterskaliert wurden (Faktor 1,5/2).

Reduktion der PKW-Größe

Es wird angenommen, dass bis 2045 ein bestimmter Anteil Personen auf ein kleineres Fahrzeug umsteigt. Um dies anzunähern, wird angenommen, dass bis 2045 alle SUV-Fahrer*innen auf ein Fahrzeug in Standardgröße umsteigen (Anteil an NZL beträgt 2022 32 % (Statista), 2045 0 %). Für 2045 wird der Anteil an SUVs im Bestand mit 10 % angenommen, Der Absatzpreis pro SUV beträgt 36.328 € (Statista). Der gesunkene Verbrauch durch den Umstieg von SUV auf ein Standardmodell wird mithilfe von Daten des ADAC abgeschätzt (2019). Der gesunkene Energieaufwand bei der Herstellung aufgrund kleinerer Fahrzeuge konnte aufgrund fehlender Daten nicht abgeschätzt werden.

Langlebiges Design der Fahrzeugbatterie

Es wird angenommen, dass sich die durchschnittliche Lebensdauer von Fahrzeugbatterien bis 2045 abhängig vom Szenario und entsprechend der Nutzungsdauer der Fahrzeuge verlängert. Statt 10 Jahren nehmen wir folgende Lebensdauer für Fahrzeugbatterien an: Baseline 12,5 (schwache Ausprägung), Verhalten 13 (mittel), Technologie 15 (stark) und Mix 17,5 Jahre (sehr stark). Dementsprechend weniger Batterien werden verkauft und der Markt und Umsatz der Batteriehersteller steigt bis 2045 weniger stark an. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Auswirkungen welche durch die Umstellung auf bestimmte langlebigere Batterietypen, Materialien und Designs nur minimal sind.

Verlängerte Nutzungsdauer

Es wird angenommen, dass sich die Nutzungsdauer der Fahrzeuge bis 2045 abhängig vom Szenario verlängert. Statt 10 Jahren nehmen wir folgende Nutzungsdauern an: Baseline 12,5 (schwache Ausprägung), Verhalten 13 (mittel), Technologie 15 (stark) und Mix 17,5 Jahre (sehr stark). Aufgrund der längeren Nutzungsdauer sinkt der Bedarf an Neuzulassungen im Jahr 2045. Es wird angenommen, dass sich der Umsatz der NZL statt auf 10 Jahre entsprechend auf 12,5; 13, 15 oder 17,5 Jahre streckt, dadurch sinkt der Umsatz der Automobilindustrie im Jahr 2045.

End of Life-Recycling-Rate erhöhen (PKW exklusive Batterie)

Es wird angenommen, dass die Steigerung der End of Life-Recyclingrate im Wesentlichen durch die Vermeidung des illegalen Exports von AFZ und der nicht anerkannten Verwertung erreicht werden kann. D.h., im Verhalten- und Mix-Szenario wird angenommen, dass es weder illegalen Export noch eine unerkannte Verwertung gibt und dadurch das Demontagepotenzial voll ausgeschöpft werden kann. Dadurch steigt der Anteil des Demontagepotenzials an den Altfahrzeugen von 15 % auf 28 % im Verhalten- und Mix-Szenario. In der Baseline und im Technologie-Szenario verbleibt es bei 15 % (Demontagepotenzial wird nicht voll ausgeschöpft). Diese Annahmen basieren auf der Studie von (Zimmermann et al. 2022). Der Erlös pro Altfahrzeug wird grob auf 294 € abgeschätzt, aufgrund verschiedener Betriebe und Geschäftsmodelle. Diese Abschätzung beruht auch auf den Daten von Zimmermann et al.

Reduktion der Batteriekapazität

Es wird angenommen, dass sich die durchschnittliche Batteriekapazität einer Fahrzeugbatterie in Zukunft verringert von 70 kWh (Baseline-Szenario) auf 40 kWh (Verhalten- und Mix-Szenario). Nach heutigen Standards würde dies einer Reichweite von ca. 450 km bzw. 250 km entsprechen. Dies

führt zu einem reduzierten Bedarf an Batterien und damit zu einem geringeren Materialbedarf. Darüber hinaus kommt es zu einer Kostenersparnis für die Endkonsumenten*inne.

End of Life-Recyclingrate erhöhen (PKW-Batterie)

Es wird angenommen, dass durch Verhaltensänderung die Menge der in Deutschland zum Recycling zur Verfügung stehenden Batterien von 20 % auf 25 % (Verhalten-Szenario) erhöht wird. Durch technologische Entwicklungen werden die materialspezifischen Rückgewinnungsquoten im Baseline-Szenario leicht und im Technologie-Szenario stark erhöht. Als Folge kommt es zu eine Nachfragereduktion an Primärmaterial und ein Zuwachs im Recyclingsektor.

Repurpose der PKW-Batterien

Wie in der Maßnahme „End of Life-Recyclingrate erhöhen" wird angenommen, dass durch Verhaltensänderungen die Gesamtmenge, der zum Repurpose zur Verfügung stehenden Batterien steigt. Zusätzlich steigt im Verhalten-Szenario die Menge der Batterien, welche sich nach der Anwendung in einem Fahrzeug noch zur Nutzung als stationärer Speicher eignen liegt im Baseline-Szenario bei 15 %, im Verhalten- und Technologie-Szenario bei 20 % und im Mix-Szenario bei 25 %. Der Zustand der Batterien (State of Health, SoH) wird im Verhalten-, Technologie- und Mix-Szenario mit 80 % Restkapazität angenommen, die Annahme im Baseline-Szenario sind 70 %. Es ergibt sich eine Nachfragereduktion an neuen Batterien für stationäre Speicher und zeitgleich ein Zuwachs an Betrieben, welche Batterien aufzubereiten und zu verkaufen sind.

Wiederverwendung von Komponenten

Es wird angenommen, dass die Steigerung des Remanufacturing erreicht wird, indem das Demontagepotenzial voll ausgeschöpft werden kann, d.h. auch hier werden illegale Exporte und illegale Verwertung verringert. Die Annahmen sind analog wie bei der Maßnahme End of life-Recyclingrate erhöhen (PKW exklusive Batterie) (siehe oben). Dies kann u.a. erreicht werden, indem Kundenvorbehalte gegenüber wieder aufbereiteten Autoteilen abgebaut werden. Darüber hinaus muss die Erlösstrukturen angepasst werden, damit die Erlöse den Aufwand decken. Es wird daher folgendes angenommen: Im Verhalten- und Mix-Szenario steigt der Erlös je Altfahrzeug von 500 € auf 750 € für Betriebe. In der Baseline und im Technologie-Szenario verbleibt er bei 500 €. Die Annahmen basieren auf den Ergebnissen von (Zimmermann et al. 2022).

Annahmen zur Rohstoffbilanzierung

Baseline. Unter Berücksichtigung der Annahmen des Baseline-Szenarios wurden die für 2045 erwarteten Rohstoffbedarfe (Baseline) sowie die zugehörigen Sektoranteile berechnet. Im Fahrzeugsektor wurde zusätzlich zu den Baseline-Ausprägungen der Maßnahmen der Umstieg auf die Elektromobilität berücksichtigt. Als Referenz dienten dazu die für 2045 angenommen PKW-Neuzulassungen.

Um die zukünftigen Bedarfe der relevanten Rohstoffe abzuschätzen, wurden diese in zwei Gruppen eingeteilt. Gruppe 1 wurden diejenigen Rohstoffe zugeteilt, die für alle Fahrzeuge relevant sind, da sie z.B. für die Karosserien verwendet werden. Es wurde angenommen, dass die Bedarfe an Rohstoffen der Gruppe 1 innerhalb des Fahrzeugsektors proportional zum erwarteten Rückgang der PKW-Neuzulassungen sinken. BEV-spezifische Rohstoffe wurden Gruppe 2 zugeteilt. Es wurde angenommen, dass der Verbrauch dieser Rohstoffe proportional zu dem bis 2045 erwarteten Anstieg der Neuzulassungen elektrischer PKWs steigen wird. Zudem wurde eine dritte Gruppe berücksichtigt, deren Bedarfe für 2045 als 0 angenommen wurden, da sie als Autokatalysatoren verwendet werden und somit Verbrennungsmotor (ICE)-spezifisch sind. Mit dem Auslaufen der Verbrennungsmotoren wird deren Anwendung im Fahrzeugsektor obsolet werden. Aus diesem Grund wurden die

Veränderungspotenziale der Rohstoff-Gruppe 3 ausschließlich zur Berechnung der Baseline-Bedarfe 2045 berücksichtigt.

Die Einteilung wurde folgendermaßen vorgenommen:

- Rohstoff-Gruppe 1 (alle Antriebe): Aluminium, Antimon, Beryllium, Borate, Cerium (3 % Sektoranteil als Glaspolitur), Indium, Molybdän, Niob, Silber, Vanadium, Yttrium, Zink.
- Rohstoff-Gruppe 2 (BEV-Antriebe): Dysprosium, Kobalt, Kupfer, Neodym, Nickel, Praseodym, Terbium.
- Rohstoff-Gruppe 3 (ICE-Antriebe): Cerium (35 % Sektoranteil als Autokatalysator), Palladium, Platin, Rhodium.

CE-Maßnahmen. Die Maßnahmen Ersetzen des Individualverkehrs (Maßnahme 1a-c), Reduktion der PKW-Größe (Maßnahme 2a), die Verlängerung der Nutzungsdauer (Maßnahme 2b) und die Wiederverwendung von Komponenten (Maßnahme 2d) wurden rohstoffübergreifend betrachtet, d.h. es wurde angenommen, dass der Bedarf aller für den Sektor relevanten Rohstoffe gleichermaßen zurückgeht. Die Veränderungspotenziale ergeben sich aus dem Produkt der relativen Einsparungen innerhalb des Sektors und den jeweiligen Sektoranteilen. Die von den Sektorexpert*innen zur Verfügung gestellten Referenzwerte für den Bedarfsrückgang waren dabei

- Maßnahmen 1a-c: die Anzahl der Neuzulassungen;
- Maßnahme 2a: die mittlere Masseneinsparung durch einen Umstieg von einem SUV auf ein Standardmodell;
- Maßnahme 2b: die mittlere Lebensdauer der Fahrzeuge; und
- Maßnahme 2d: die Masse verwerteter Autoteile im Verhältnis zur Masse der im selben Jahr neuzugelassenen Fahrzeuge.

Die Bewertung der batteriespezifischen Maßnahmen 3a-d wurden rohstoffspezifisch für Kobalt, Nickel, Aluminium und Kupfer vorgenommen. Die Veränderung wurden als Massen (in t bzw. t/a) angegeben. Die Veränderungspotenziale ergeben sich aus dem Quotienten der eingesparten bzw. Mehrrecycelten Materialmassen und dem deutschen Gesamtverbrauch. Als Referenzwerte dienten

- Maßnahmen 3a, c: die Reduktion der Materialmassen pro Jahr; und
- Maßnahme 3b: Massen recycelter Materialien.

Die Maßnahme 2c (End of Life-Recyclingrate erhöhen) wurde von den Sektorexpert*innen als geringfügig eingeschätzt und nicht quantifiziert. Die Maßnahme 3d (Repurpose von PKW-Batterien) wurde ebenfalls nicht quantifiziert, da die End of Life-PKW-Batterien meist als stationäre Energiespeicher eingesetzt werden. Somit werden die Rohstoffe den in dieser Studie betrachteten Sektoren entzogen und haben keine direkte Auswirkung auf die Materialbilanzen des Fahrzeugsektors.

7.2.2 Hoch- und Tiefbau

CE-Maßnahmen und deren Ausprägung in den Szenarien

Tabelle 7-6: CE-Maßnahmen Hoch- und Tiefbau

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1	Reduktion der Wohn- und Büroraumin-anspruchnahme	Es wird angenommen, dass die Pro-Kopf-Wohnfläche im **Hochbau** durch kleinere Wohnräume und/oder alternative Nutzungsformen (bspw. Gemeinschaftsräume) stagniert. Außerdem wird angenommen, dass die Bürofläche im **Hochbau** durch kleinere Büroräume, alternative Nutzungsformen (bspw. Homeoffice oder Desk-Sharing) reduziert werden kann.	Rethink
2	Wiederverwendung von Bauteilen	Durch Berücksichtigung der Demontage bei der Planung von Gebäuden sowie der Standardisierung und Modularisierung von Bauteilen, können diese im **Hochbau** teilweise direkt wiederverwendet werden.	Remanufacture, Repurpose
3	Verlängerte Lebensdauer von Gebäuden	Durch die Weiter- oder Umnutzung von Gebäuden im **Hochbau** kann die Lebensdauer verlängert werden. Voraussetzung hierfür sind die Reparatur, Renovierung, Sanierung und Instandhaltung dieser Gebäude, welche durch entsprechendes Design unterstützt werden können.	Reuse, Repair, Refurbish
4	Reduktion des Klinkerfaktors	Der Klinkerfaktor (der Klinkereinsatz im Zement) im **Hoch- und Tiefbau** kann durch den Einsatz alternativer Bestandteile wie bspw. Nebenprodukte aus der Industrie reduziert werden.	Refuse
5	Verwendung alternativer Bindemittel	Durch den Einsatz alternativer Bindemittel im **Hoch- und Tiefbau** kann der Zementeinsatz im Beton reduziert werden.	Refuse
6	Nutzung nachwachsender Materialsubstitute	Durch den vermehrten Holzbau für Einfamilienhäuser im **Hochbau**, können die emissionsintensiven Materialien Stahl und Zement substituiert werden.	Refuse
7	Reduktion des Einsatzes von Baustahl und Strukturbeton durch Design	Durch die verringerte Überspezifikation, Leichtbau und den Einsatz von Bautechnologien, kann der Materialeinsatz je Bauteil im **Hoch- und Tiefbau** reduziert werden.	Reduce
8	Wiederverwendung von Baustahl	Baustahl kann teilweise direkt im **Hoch- und Tiefbau** wiederverwendet werden, sodass kein Sekundär- und/oder Primärproduktion notwendig ist.	Repurpose
9	Zementrecycling	Durch innovative Technologien ist auch das Recycling von Zement im **Hoch- und Tiefbau** möglich.	Recycle

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Trotz der gemeinsamen Darstellung der Maßnahmen für Hoch- und Tiefbau in obiger Tabelle erfolgt die Modellierung getrennt. Im Vergleich zur Machbarkeitsstudie wurden die Maßnahmen teilweise modellierungsbedingt zusammengefasst oder aus inhaltlichen Gründen umformuliert. Für Hochbau heißt dies Folgendes: Die Maßnahmen zur Reduktion der Flächeninanspruchnahme wurden zusammengefasst, da nur ein Modellinputparameter, die Gebäudeflächenentwicklung, adressiert wird. Die Planung für die Demontage von Gebäuden und Herstellung standardisierter Bauelemente wird als Wiederverwendung von Bauteilen berücksichtigt, da die beiden vorher genannten “Enabler” hierfür sind und daher nur einen Modellparameter, die Wiederverwendung von Bauteilen adressieren. Die lokale Beschaffung von Steinen wurde aufgrund der geringen emissionsmäßigen Bedeutung im Ver-

gleich zu den Grundstoffen Stahl und Zement ausgeklammert. Die Verwendung von Nebenprodukten aus der Industrie wurde zu Reduktion des Klinkerfaktors umbenannt, da ersteres wiederum ein "Enabler" für den tatsächlichen Wirkmechanismus ist. Außerdem ist die Verfügbarkeit von Industrienebenprodukten prospektive limitiert, es können jedoch andere Materialien eine Rolle spielen. Die Nutzung biobasierter Materialsubstitute wurde für Gebäude auf den Holzbau limitiert, da andere Materialien eher Nischenanwendungen sind. Dies ist beispielsweise die Materialsubstitution mit Bioverbundwerkstoffen für Infrastruktur, die aktuell eine untergeordnete Rolle spielt, aber langfristig relevant werden kann. Ein Beispiel hierfür ist in untenstehender Textbox beschrieben.

Die Partikel-Packung-Technologie wurde aufgrund der geringen Bedeutung ausgeklammert, genauso wie die Rücknahmesysteme für Dämmstoffe, da der Fokus hier auf den emissionsintensiven Grundstoffen Stahl und Zement liegt. Die Reduktion der Materialnutzung durch Design und die Bautechnologien zu Abfallreduktion werden kombiniert unter der Materialreduktion betrachtet, da der Modellmechanismus identisch ist. Die Wiederverwendung von Baumaterialien wird für Stahl betrachtet, da sie für Beton bzw. Zement keine Rolle spielt. Die erhöhte Verwendung von recyceltem Material wird ausschließlich für Zement betrachtet, da bereits heute hauptsächlich Sekundärstahl eingesetzt wird. Im Tiefbau wurden außerdem die gleiche Formulierung und Gruppierung der Maßnahmen wir im Hochbau umgesetzt.

Info-Box: Smart Circular Bridges – Ein "best practice"-Beispiel für Materialsubstitution in Infrastruktur

Im Rahmen des Interreg-Projektes "Smart Circular Bridges" werden drei Brücken für Fußgänger*innen und Radfahrer*innen in Deutschland und den Niederlanden geplant, umgesetzt sowie die Marktfähigkeit des Materials untersucht. Im Gegensatz zur herkömmlichen Bauweise werden dort Bioverbundwerkstoffe eingesetzt, die aus biobasierten Flachsfasern und Harzen bestehen. Diese Harze sind zu 40 bis 50 % biobasiert. Theoretisch wäre auch der vollständige biobasierte Einsatz möglich, jedoch ist die Verfügbarkeit aktuell wirtschaftlich limitiert. Das Material erreicht Festigkeiten, die mit Aluminimum und Stahl vergleichbar sind. Dabei wird eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren angestrebt. Nach Ende der Lebensdauer kann das Material sowohl energetisch als auch mechanisch wiederverwendet werden. Hierbei kommt es jedoch zum Downcycling. Chemisches und biologisches Recycling des Materials ist aktuell noch in der Laborphase. Es kommt ein Sensorsystem zum Einsatz, welches Materialverhalten und Umweltauswirkungen während der Nutzung überwacht und so relevante Informationen zur Materialermüdung in Echtzeit bereitstellt, aber auch Daten für vergleichbare Projekte sammelt. Das Projekt zeigt am praktischen Beispiel, welches Potenzial Materialsubstitution in Infrastrukturen haben kann, aber auch welchen Limitationen es gibt. Vorteile ergeben sich nicht nur aufgrund der niedrigeren Treibhausgasemissionen bei der Herstellung, sondern auch durch eine freiere Gestaltung der Bauteile und eine kürzere Bauzeit, da die Elemente vorgefertigt sind. Limitationen ergeben sich insbesondere aus der Verfügbarkeit der Materialien. Während der Einsatz von biobasierten Harzen aufgrund der Wirtschaftlichkeit limitiert ist, kommt für die Flachsfasern auch die nachhaltige Verfügbarkeit aufgrund der benötigten Anbauflächen hinzu. Auch der Bau größerer Brücken bspw. für den motorisierten Verkehr wäre durch eine Modularisierung der Infrastruktur möglich. Aufgrund der geringen Erfahrungswerte mit dem Material wird dies jedoch vorerst für weniger komplexe Infrastruktur angestrebt. Ein Einsatz in Gebäuden wäre aufgrund geringerer Umwelteinwirkungen auch mit längeren Lebensdauern möglich, jedoch ist das Material brennbar und muss entsprechend behandelt werden, um die jeweiligen Brandschutzanforderungen zu erfüllen. Aufgrund der hohen Relevanz solcher Pilotprojekte zur Materialsubstitution in Infrastrukturen sind weitere Forschungsprojekte notwendig und sinnvoll, damit es nicht nur bei Nischen-Anwendungen bleibt.

Abbildung 7-2: Smart Circular Bridge (Almere)

Quelle: © Smart Circular Bridge; (North West Europe 2023; Blok et al. 2019)

Tabelle 7-7: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Hoch- und Tiefbau)

	Maßnahme	Base-line	Techno-logie	Ver-halten	Mix	Schlüsseltreiber
1	Reduktion der Wohn- und Büroraumi-nanspruchnahme	Nein	Nein	Stark	Stark	Konsumverhalten
2	Wiederverwendung von Bauteilen	Nein	Mittel	Nein	Mit-tel	Politik Produktion
3	Verlängerte Lebensdauer von Ge-bäuden	Nein	Nein	Stark	Stark	Politik Konsum, Konsum-verhalten
4	Reduktion des Klinkerfaktors	Nein	Stark	Mittel	Stark	Politik Produktion
5	Verwendung alternativer Bindemittel	Nein	Stark	Mittel	Stark	Technologischer Fort-schritt, Politik Produktion
6	Nutzung nachwachsender Materi-alsubstitute	Nein	Nein	Stark	Stark	Konsumverhalten
7	Reduktion des Einsatzes von Bau-stahl und Strukturbeton durch Design	Nein	Stark	Nein	Stark	Politik Produktion
8	Wiederverwendung von Baustahl	Nein	Mittel	Nein	Mit-tel	Politik Produktion

	Maßnahme	Base-line	Techno-logie	Ver-halten	Mix	Schlüsseltreiber
9	Zementrecycling	Nein	Stark	Nein	Stark	Technologischer Fort-schritt

Quelle: Eigene Auswertung.

Begründung der Ausprägung

Das Baseline-Szenario basiert im Wesentlichen auf einer Beibehaltung des Status quo, obwohl teilweise zusätzliche Maßnahmen im geringen Umfang umgesetzt werden. Im Rahmen des Bausektors wird jedoch davon ausgegangen, dass diese sich entweder schon in den aktuellen Trends widerspiegeln (insbesondere Produktion und technologischer Fortschritt) oder die Änderungen des Konsumverhaltens bei langlebigen Produkten, wie im Bausektor üblich, keine kurzfristige Rolle spielen – insbesondere dann, wenn der Impuls niedrig ist.

Änderungen gegenüber dieser Baseline werden im Technologie-Szenario im Wesentlichen durch produktions- und technologiebasierte Lösungen erreicht. Das heißt, die Maßnahmen, welche die herkömmliche Bereitstellung (bspw. Bauweise) und Nutzung (bspw. Pro-Kopf-Fläche) nicht verändern, sind relevant und in der Regel stark ausgeprägt. Dies begründet sich sowohl durch die politische Förderung von Technologien sowie einer hohen Diffusion innovativer Produktionstechnologien. Dem gegenübersteht das Verhalten-Szenario, in dem jene Maßnahmen im Fokus stehen, die Änderungen der Bauweise und des Nutzungsverhaltens unterstellen. Dies ist sowohl auf wachstumsdämpfende Maßnahmen als auch ein verändertes Konsumverhalten zurückzuführen. Die Aufteilung und Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien wurden bewusst gewählt, um die Extrema (Technologie- und Konsum-Fokus) abzubilden. Eine Ausnahme dieser Zuordnung bilden die Maßnahmen zur Reduktion des Klinkerfaktors und des Einsatzes alternativer Bindemittel, die zwar einen Technologie-Fokus haben, jedoch auch in geringerem Umfang im Verhalten-Szenario umgesetzt werden. Dies ist dadurch begründet, dass die Maßnahmen auch durch eine Änderung der Verhaltensweise, bspw. der öffentlichen Beschaffung, angereizt werden kann. Somit werden diese Maßnahmen aufgrund ihrer derzeitigen Marktreife auch bei einem langsameren technologischen Fortschritt schneller relevant als andere technologische und produktionsorientierte Maßnahmen.

Schlussendlich ist das Mix-Szenario eine Zusammenführung des Technologie- und des Verhalten-Szenarios unter Berücksichtigung der maximalen Potenziale. Das heißt, dass die beiden Extrema zusammengeführt werden.

Obwohl die Ausprägung hier gebündelt für Hoch- und Tiefbau dargestellt ist, erfolgt die Modellierung und somit die Quantifizierung getrennt.

Modellierungsdaten und Annahmen

Die Modellierung der Maßnahmen für den Hoch- und Tiefbau erfolgt trotz der gemeinsamen Darstellung getrennt. Für die Modellierung des Hochbaus wurde für die Maßnahmen 1-3 und 6-9 ein Bottom-up-Materialflussmodell für Gebäude als wesentliches Produkt im Hochbau genutzt (Lotz und Herbst unveröffentlicht; Lotz et al. unveröffentlicht). Dies basiert auf der Gebäudeflächenentwicklung und Gebäudearchetypen. Für die Maßnahmen 4 und 5 wurde eine top-down Abschätzung basierend auf den Ergebnissen der Bottom-up-Modellierung getroffen. Die Umsetzungsreihenfolge der Maßnahmen folgt der Logik der 9R (6, 1, 7, 3, 2, 8, 9) mit Ausnahme von Maßnahme 4 und 5, da diese den gesamten Hochbau und nicht nur Gebäude betreffen. **Dieser Reihenfolge kommt aufgrund**

der Interaktion der Maßnahmen eine wesentliche Bedeutung zu (bspw. Geringere Sekundärmaterialverfügbarkeit bei rückläufigem Konsum). Eine Übersicht der Modelldaten ist in untenstehender Tabelle abgebildet. Die Parametrisierung der Modellinputs basiert hierbei auf einer Zusammenstellung diverser Literaturquellen sowie dem Input aus Interviews und/oder Mail. Außerdem wurde der Energiebedarf für die Änderung der Flächen im Gebäudebereich überschlägig bestimmt (**nicht modelliert**).

Für die Reduktion der Wohnraum- und Büroraumininanspruchnahme wurde als wesentlicher Modellinput die Gebäudebestandsentwicklung aus dem Projektionsbericht genutzt. Im Gegensatz zur leichten Steigerung der Wohngebäude und Gewerbeflächen wurde für die Umsetzung der Maßnahme im Verhalten- und Mix-Szenario eine Stagnation dieser Flächen angenommen. D.h. es wurde keine Reduktion der Flächen im Status quo berücksichtigt, sondern keine weitere Zunahme. Diese Annahme wurde im Rahmen der Interviews festgelegt.

Für die Wiederverwendung von Bauteilen wurde sich an einem Fallbeispiel aus Deutschland orientiert. Demnach konnten bis zu 38 % der Fertigbauteile wiederverwendet werden. Da dies jedoch nur ein Fallbeispiel war und in der Praxis Komponenten im Gebäudebestand nicht standardisiert sind, wurde im Mix-Szenario angenommen, dass nur die Hälfte dieses Potenzial, sprich 19 %, bis 2045 im Technologie- und Mix-Szenario ausgenutzt wird (Asam 2008).

Bei der verlängerten Lebensdauer wurden zwei Optionen betrachtet: die Reduktion des Gebäudeabriss aufgrund von technischen Anforderungen sowie Denkmalschutz von Gebäuden, die vor 1945 gebaut wurden. Rund 30 % des Gebäudeabriss sind auf Mängel bei technischen Anforderungen rückzuführen, dies könnte jedoch durch eine Nachrüstung für alle Gebäudealtersklassen ausgeglichen werden (Huuhka und Lahdensivu 2014). Außerdem können Bestandsgebäude, die besonders schützenswert erscheinen von Abriss ausgenommen und umgenutzt werden. Rund 43,8 % dieser besonders schützenswerten Gebäude wurden abgerissen, um an gleicher Stelle neuzubauen (Metabolic 2022). Beide Werte wurden als maximales Potenzial im Verhalten- und Mix-Szenario dieser Maßnahme angenommen, ohne jedoch Begrenzungen durch verfügbare Arbeitskräfte zu berücksichtigen.

Der aktuelle durchschnittliche Klinkerfaktor in Deutschland beläuft sich auf 0,7. Durch den Einsatz alternativer Bestandteile wie bspw. Industrienebenprodukte oder Puzzolane kann der Anteil weiter reduziert werden. Diese Maßnahme wird aktuell schon aus Gründen der Wirtschaftlichkeit umgesetzt. Die weitere Reduktion ist jedoch aufgrund der Verfügbarkeit der Ersatzstoffe limitiert (VDZ 2020). Daher wird im Verhalten-Szenario eine Reduktion auf 0,65 angenommen, da kaum weitere Potenziale aus alternativen Bestandteilen wie Puzzolane erschlossen werden. Im Technologie- und Mix-Szenario werden diese Potenziale erschlossen, sodass eine maximale Reduktion auf 0,6 erfolgt.

Eine vergleichbare Maßnahme ist der Einsatz der alternativen Bindemittel bzw. Innovativer Zementsorten. Diese können die THG-Emissionen gegenüber der konventionellen Zementherstellung um 30-50 % reduzieren. Im Gegensatz zur herkömmlichen Herstellung ist die Produktion jedoch weniger wirtschaftlich, weswegen sich der Einsatz als Substitut im Wesentlichen für Zemente mit hohem Klinkeranteil (CEM I/Portland-Zement) und Fertigbauteile (i.d.R. aus Portland-Zement) eignet. Aufgrund der Limitationen wird ein maximaler Marktanteil von 5 % im Technologie- und Mix-Szenario angenommen. Aufgrund der langsameren technologischen Entwicklung im Verhalten-Szenario wird hier ein Höchstwert von 2,5 % berücksichtigt (VDZ 2020).

Die Nutzung nachwachsender Materialien im Bau und insbesondere Holzbau können die Verwendung von Stahl und Zement reduzieren, jedoch nicht vollständig vermeiden (Nemry und Uihlein 2008). Der Einsatz ist durch bautechnische Anforderungen bei mehrgeschossigen Gebäuden limitiert, aber nicht ausgeschlossen. Dem gegenüber steht jedoch die nachhaltige Verfügbarkeit von

Holz für den Einsatz im Bausektor. Folglich wird der Holzbau nur für Einfamilienhäuser, hier jedoch für alle Gebäude im Verhalten- und Mix-Szenario berücksichtigt.

Sowohl Stahl als auch Beton können durch entsprechendes Design in Gebäuden reduziert werden. Hier wird eine maximale Ausschöpfung der Potenziale im Technologie- und Mix-Szenario nach Le Den et al. (2020) angenommen.

Außerdem kann Stahl teilweise direkt wiederverwendet werden. Aktuell ist dies zwar noch durch regulatorische Hemmnisse limitiert, wird aber im Technologie- und Mix-Szenario berücksichtigt. Die Literaturangaben zu den Potenzialen variieren deutlich. Zwischen 10 % und 75 % können bei Prozessverlusten von 61 % bis 91 % wiederverwendet werden (Cooper und Allwood 2012; Coelho et al. 2020). Da bisher in Deutschland wenig Erfahrungswerte hiermit vorhanden sind, wird eine direkte Wiederverwendung von 6 % Stahls angenommen.

Das Zementrecycling ist eine innovative Technologie, durch die Zement aus Beton zurückgewonnen werden kann und somit die Primärproduktion teils substituieren kann. Die Wirtschaftlichkeit und die Prozessverluste limitieren diese Technologie aktuell (Le Den et al. 2020; Groep 2019). Außerdem wird ein Großteil des Betons nach Ende der Lebensdauer im Straßenbau eingesetzt (open-loop Recycling) und steht somit nicht für die Verwendung in Gebäuden zur Verfügung. Folglich wird ein maximales Recycling von 10 % des Zements nach Ende der Gebäudelebensdauer angenommen.

Tabelle 7-8: Parametrisierung der Modellinputs im Hochbau

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Modellinput
1	Reduktion der Wohnrauminanspruchnahme	Referenz	Referenz	Stagnation pro Kopf	Stagnation pro Kopf	Gebäudebestandsentwicklung aus Projektionsbericht
2	Reduktion der Bürorauminanspruchnahme	Referenz	Referenz	Stagnation pro Kopf	Stagnation pro Kopf	Gebäudebestandsentwicklung aus Projektionsbericht
3	Wiederverwendung von Bauteilen	0	19 %	0 %	19 %	Betonfertigteile für Wiederverwendung
4	Verlängerte Lebensdauer von Gebäuden	0	0	43,8 %, 30 %	43,8 %, 30 %	Denkmalschutzquote, Renovierungsquote
5	Reduktion des Klinkerfaktors	0	0,6	0,65	0,6	Klinkerfaktor
6	Verwendung alternativer Bindemittel	0	5 %	2,5 %	5 %	Zementanteil
7	Nutzung nachwachsender Materialsubstitute	0	0	100 %	100 %	EFH-Anteil
8	Reduktion des Einsatzes von Baustahl durch Design	0	41 %	0,00 %	41 %	Reduktion
8	Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design	0	12 %	0 %	12 %	Reduktion
9	Wiederverwendung von Baustahl	0	6 %	0 %	6 %	Stahl für Wiederverwendung
10	Zementrecycling	0	10 %	0 %	10 %	Recyclingfluss mit Verlusten

Die Modellierung des Tiefbaus erfolgt ausschließlich top-down anhand der Fortschreibung aktueller Produktionstrends. Die Maßnahmenreihenfolge entspricht dem Hochbau. Für die Quantifizierung der Maßnahmen wurde auf bestehende Literaturquellen zurückgegriffen. **Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die aktuelle Literatur im Wesentlichen auf den Hochbau bezieht und die Potenziale im Tiefbau unbekannt sind.** Daher wurde angenommen, dass dem Tiefbau grundsätzlich niedrigere Potenziale als dem Hochbau zugeordnet werden können aufgrund von Sicherheitseinschränkungen sowie der Auftraggeber*innenstruktur, da davon ausgegangen wird, dass öffentliche Auftraggeber*innen bereits möglichst kosten- und somit materialeffizient arbeiten.

Die Reduktion des Klinkerfaktors und der Einsatz alternativer Bindemittel orientieren sich hierbei an der Quantifizierung der Modellinputs für den Hochbau, da diese Maßnahmen nicht spezifisch für den Nutzungssektor sind.

Für die Reduktion von Stahl und Beton durch Design wurde die Hälfte des Potenzials aus dem Hochbau angenommen aufgrund der einleitend beschriebenen Überlegungen, die auch im Rahmen der Interviews bestätigt wurden.

Bei der Wiederverwendung von Baustahl wurde ein geringfügig höheres Potenzial berücksichtigt, da die Wiederverwendung im Tiefbau aufgrund der Auftraggeber*innenstruktur (i.d.R. öffentlich Hand) sowie der Stahlprodukte (bspw. Leitplanken) leichter umzusetzen ist.

Auch für das Zementrecycling wurde ein höheres Potenzial aufgrund der Auftraggeber*innenstruktur (i.d.R. öffentlich Hand) sowie der zentralen Sammlung größeren Betonmengen angenommen.

Tabelle 7-9: Parametrisierung der Modellinputs im Tiefbau

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Modellinput
1	Reduktion der Wohnrauminanspruchnahme	0	0	0	0	Gebäudebestandsentwicklung
2	Reduktion der Bürorauminanspruchnahme	0	0	0	0	Gebäudebestandsentwicklung
3	Wiederverwendung von Bauteilen	0	0	0	0	Betonfertigteile für Wiederverwendung
4	Verlängerte Lebensdauer von Gebäuden	0	0	0	0	Denkmalschutzquote, Renovierungsquote
5	Reduktion des Klinkerfaktors	0	0,6	0,65	0,6	Klinkerfaktor
6	Verwendung alternativer Bindemittel	0	5 %	3 %	5 %	Zementanteil
7	Nutzung nachwachsender Materialsubstitute	0	0	0	0	Best Practice zu biocomposites für Brücke
8	Reduktion des Einsatzes von Baustahl durch Design	0	21 %	0,00 %	21 %	Reduktion
8	Reduktion des Einsatzes von Strukturbeton durch Design	0	6 %	0 %	6 %	Reduktion
9	Wiederverwendung von Baustahl	0	10 %	0 %	10 %	Ersetzt
10	Zementrecycling	0	25 %	0,00 %	25 %	Ersetzt

Annahmen zur Rohstoffbilanzierung

Allgemein. Als Input wurden die von Seiten der Sektorexpert*innen auf Szenarien- und Maßnahmenebene zur Verfügung gestellten Werte für die Bedarfe (in t) der Baustoffe Primärstahl, Sekundärstahl, recycelter Zement und alternative Bindemittel verwendet.

Aufgrund der Datenlage wurden Hoch- und Tiefbau für die Rohstoffbilanzierung zusammengefasst und als Bausektor betrachtet. Da sowohl in der Primär-, als auch in der Sekundärstahlroute Legierungselemente (Molybdän, Nickel, Niob, Vanadium) zugesetzt werden, wurde nicht zwischen Primär- und Sekundärstahl unterschieden, sondern Stahl routenunabhängig betrachtet. Die relative Veränderung des Stahlbedarfs wurde als Proxy für andere Baustoffe verwendet.

Die Bausektor-relevanten Rohstoffe wurden folgendermaßen nach deren Nutzung als Baustoffe gegliedert:

- Stahl: Molybdän, Nickel, Niob, Vanadium, Zink;
- Glas: Borate, Silber, Quarzsand;
- Aluminium;
- Kupfer;
- Blei.

CE-Maßnahmen. Die Maßnahmen Reduktion der Rauminanspruchnahme (Maßnahme 1) und Wiederverwendung von Bauteilen (Maßnahme 2) wurden rohstoffübergreifend betrachtet. Dabei wird angenommen, dass sich die Bedarfe aller sektorrelevanten Rohstoffe gleichermaßen verändern. Die relative Veränderung des Stahlbedarfs wurde für alle betroffenen Rohstoffe als Proxy verwendet. Die Veränderungspotenziale ergeben sich aus dem Produkt der relativen Veränderung innerhalb des Sektors und den jeweiligen Sektoranteilen.

Für die Maßnahmen Verlängerung der Lebensdauer (Maßnahme 3), Nutzung nachwachsender Materialsubstitute (Maßnahme 6), Reduktion von Baustahl und Strukturbeton durch Design (Maßnahmen 7) und Wiederverwendung von Baustahl (Maßnahmen 8) wurde angenommen, dass sich die Bedarfsreduktion nur auf die Bausubstanz und damit die Stahl-relevanten Rohstoffe Molybdän, Nickel, Niob, Vanadium und Zink auswirkt. Der Grund für diese Annahme ist, dass Glas- und aluminiumhaltige Bauteile wie Fenster oder Türrahmen werden bei einer Verlängerung der Lebensdauer durch Renovation oder Sanierung nicht erhalten werden. Zudem wird angenommen, dass sich der Einsatz von nachwachsenden Materialsubstituten nur auf den Ersatz der Bausubstanz auswirkt.

Der Einsatz von alternativen Bindemitteln (Maßnahmen 5) kann sich je nach Art des Bindemittels auf den Bedarf von Quarzsand auswirken. Zur Quantifizierung wurde angenommen, dass als alternative Bindemittel jeweils zu einem Drittel Calciumsulfoaluminat-Zemente, Calciumhydrosilicate, und Calciumsilicathydrate eingesetzt werden. Für die Herstellung von Calciumhydrosilicaten werden pro Tonne Bindemittel 200 kg Quarzsand benötigt (VDZ 2020).

Die Maßnahmen Reduktion des Klinkerfaktors (Maßnahmen 4) und Zementrecycling (Maßnahme 9) wurden nicht quantifiziert, da weder Klinker noch Zement einen der betrachteten Rohstoffe beinhalten.

7.2.3 IKT und Haushaltsgeräte

CE-Maßnahmen und deren Ausprägung in den Szenarien

Tabelle 7-10: CE-Maßnahmen IKT & Haushaltsgeräte

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1	Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Geräten	Die Maßnahme besteht aus 3 Submaßnahmen: (1) Langlebiges und Reparaturfreundliches Design, (2) Vermehrte Nutzung von Second-Hand-Geräten, und (3) Product-as-a-Service (Mietmodell)	Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish
2	Remanufacturing	Das Remanufacturing bezieht sich auf die (Wieder-)Verwendung von Komponenten für die Herstellung neuwertiger Produkte.	Remanufacture
3	Verbesserte Sammlung und erhöhte Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten	Die Maßnahme bezieht sich auf die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen für den Einsatz bei der Herstellung neuer Produkte (nicht in den Sektoren IKT und Haushaltsgeräte). Diese wird durch bessere Sammlung und Verwertung von Endgeräten erreicht.	Recycle, Recover
4	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	Rethink, Reduce

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Die Modellierung von IKT und Haushaltsgeräten beinhaltete folgende Geräte: Smartphones, Tablets, Notebooks, Desktop-PCs, TV-Geräte, Waschmaschinen, Wäschetrockner, Kühl- und Gefriergeräte und Geschirrspüler. Die Modellierung der Treibhausgasemissionen fand anhand Ökobilanzdaten (bottom-up) statt. Die anderen ökologischen und ökonomischen Wirkungen wurden mithilfe der EE-MRIO (top-down) durchgeführt.

Die Maßnahme zur Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Endgeräten besteht aus 3 Submaßnahmen:

- **Langlebiges und Reparaturfreundliches Design**: Die Auswahl von qualitativ hochwertigen Bauteilen und Materialien und reparaturfreundliches Design führen zu einer Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeit, Verbesserung der Zuverlässigkeit und Haltbarkeit und Vereinfachung der Reparaturen. Die verlängerte Nutzungsdauer findet beim Erstnutzer statt.
- **Vermehrte Nutzung von wiederaufbereiteten und Second-Hand-Geräten**: Geräte werden nach der Erstnutzung weitergegeben und zumindest in eine Zweitnutzung überführt.
- **Product-as-a-Service (Mietmodell)**: 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 Kund*innen für die uneingeschränkte Nutzung für eine im Vertrag vordefinierte Zeit. Ob die verlängerte Lebens- und Nutzungsdauer beim Erstnutzer und bei mehreren Nutzern erreicht wird, wird nicht gesondert betrachtet.

Die erreichte Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung (in Jahren) für die obengenannten 3 Submaßnahmen wurde gleich angenommen. Die Effekte der 3 Submaßnahmen wurden summiert, da die zum gleichen Ziel, nämlich, eine Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Endgeräten, beitragen. Der jeweilige Beitrag der Submaßnahmen bei der Treibhausgasemissionsreduktion wurde anhand deren geschätzten Marktanteile berechnet. Aus der Machbarkeitsstudie wurde die Maßnahme „erfolgreiche Reparaturen an Endgeräten nehmen zu“ in die genannten 3 Submaßnahmen integriert. Dagegen wurde die Maßnahme „Product-as-a-Service: Nutzungsintensivierung durch Sharing-Modelle“ aufgrund der geringen und sinkenden Marktbedeutung aus der Modellierung ausgeklammert.

Bei der Maßnahme Remanufacturing wurde aufgrund von fehlenden Daten zwischen IKT und Haushaltsgeräten nicht unterschieden und die Modellierung mithilfe von EE-MRIO top-down durchgeführt. Die Kerngröße der Modellierung war die aktuellen und erwarteten Umsatzveränderungen in den Refurbishment- und Elektro- und Elektronikgerätesektoren in Deutschland. Es wird angenommen, dass die Umsatzsteigerungen im Remanufacturing-Sektor negativ auf Umsätze im Elektro- und Elektronikgerätesektor wirken. Als Vergleichsgrundlage wurden die Treibhausgasemissionen anhand von Ökobilanzdaten bottom-up hochskaliert. Dabei wurden vereinfacht die Anzahl der Refurbished-Komponente und die durchschnittlichen Treibhausgasemissionseinsparungen pro Refurbished-Komponente herangezogen.

Die Maßnahme zur verbesserten Sammlung und erhöhter Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten wurden anhand von statistischen Daten bzgl. des Abfallaufkommens an betrachteten Endgeräten, deren Sammelquoten und den Recyclingquoten von ausgewählten Rohstoffen, berechnet. Für die Modellierung wurden die Daten zu jeweiligen Materialzusammensetzungen der Endgeräte zusammengestellt. Anschließend wurden material- bzw. rohstoffspezifische Verluste bei der Vor- und Nachbehandlung angenommen, um insgesamt die zurückgewonnenen Mengen pro Rohstoff zu ermitteln. Die Umweltentlastungseffekte aufgrund der Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten wurden anhand des vermiedenen Aufwandes der Primärgewinnung abgeleitet, wobei der Aufwand bei der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen berücksichtigt wurde. Die Rückgewinnung von folgenden Rohstoffen wurde modelliert: Stahl, Aluminium, Gold, Silber, Kupfer, Kobalt, Lithium und Palladium.

Eine Kerngröße bei der Modellierung der ressourceneffizienten Nutzung von Rechenzentren war die Marktentwicklung von Serverzahlen. Im Baseline-Szenario wurde mit einem starken und in den Verhalten-, Technologie- und Mix-Szenarien mit einem verringerten Marktwachstum modelliert. Die Annahmen, warum der Markt in den CE-Szenarien langsamer wächst als im Baseline, bezogen sich auf die Verbesserung des Rechenzentrummanagements, wie z.B. Verbesserung der IT-Last, höhere Konsolidierung- und Virtualisierung der IT-Technik usw. Entsprechend reduzierte sich auch der Materialaufwand der Herstellung der IT-Technik im Vergleich zum Baseline.

Tabelle 7-11: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (IKT & Haushaltsgeräte)

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
1	Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Geräten	Schwach	Mittel	Stark	Stark	Politik Konsum, Konsumverhalten
2	Remanufacturing	Schwach	Mittel	Schwach	Mittel	Politik Produktion
3	Verbesserte Sammlung und erhöhte Rückgewinnung von	Schwach	Stark	Schwach	Stark	Technologischer Fortschritt, Politik Produktion

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
	Rohstoffen aus den Endgeräten					
4	Ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren	Schwach	Stark	Mittel	Stark	Technologischer Fortschritt, Politik Produktion, Politik Konsum

Quelle: Eigene Auswertung.

Begründung der Ausprägung

Die Bereitschaft der Verbraucher*innen, höhere Preise für langlebige Produkte zu bezahlen, steigt nicht linear mit der höheren Lebensdauer. Die Spitzenprodukte bleiben im Nischenbereich und können nur bedingt mit der Verbrauchernachfrage im Massenmarkt etabliert werden. Verpflichtende Mindeststandards, wie z.B. Mindestlebensdaueranforderungen, verlängerte Gewährleistungsfristen, verpflichtende Garantieaussagen, längere Ersatzteilverfügbarkeit usw., können die Qualität der Produkte im Massenmarkt erhöhen. Dadurch ändert sich das Verhalten der Verbraucher*innen automatisch, da die Wahrscheinlichkeit, minderwertige Ware zu kaufen, sinkt. Die Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung erfordert keine neuen technologischen Weiterentwicklungen und ist heute schon möglich, z.B. wenn hochwertige Bauteile eingesetzt werden, Reparaturen einfach mit gängigen Werkzeugen durchgeführt werden können und ein großer Wert auf ein langlebiges Design gelegt wird. Dass die Lebens- und Nutzungsdauer von Geräten sinkt oder sich in vielen Fällen auf einem geringen Niveau befindet, hat eher ökonomische Gründe. Aus diesem Grund wird die CE-Maßnahme „Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung“ mit stärkerer Ausprägung bzw. mit stärkerem Ambitionsniveau dem Verhalten-Szenario zugeordnet als dem Technologie-Szenario.

An dieser Stelle ist es erwähnenswert, dass die 3 Submaßnahmen zur Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung, einzeln betrachtet, unterschiedliche Ausprägungen in den Szenarien mit sich bringen würden. Beispielsweise verursacht die Umsetzung von Mietmodellen in der Anfangsphase höhere Kosten für Unternehmen. Unternehmen müssen diese Kosten an die Verbraucher*innen weitergeben oder in Mietmodellen komplexe, vertragliche Konstruktionen zur Minimierung der Geschäftsrisiken unterbringen. Das sinkt seitens der Verbraucher*innen die Bereitschaft zur Aufnahme von solchen Geräten und Modellen. Aktuell werden Mietmodelle nur in wenigen Pilotanwendungen erprobt. Solide Erkenntnisse über die Wirksamkeit und Diffusion von solchen Modellen liegen nicht vor. Unternehmen müssen zukünftig ihre Angebote so definieren, damit sie für den Massenmarkt attraktiv werden. Daher wäre die Ausprägung dieser Submaßnahme an sich in allen Szenarien eher schwach. Die aus heutiger Sicht geringe Bedeutung von Mietmodellen wurde in der Modellierung berücksichtigt, indem geringe Markt- und Wachstumsraten für solche Modelle angenommen wurden. Auch für eine erhöhte Diffusion von Second-Hand-Geräten ist eine Verbesserung der ökonomischen Rahmenbedingungen zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit dieser Geschäftsmodelle notwendig, damit sie für die Verbraucher*innen einen realen, ökonomischen Vorteil gegenüber konventionellen, linearen Geschäftspraktiken abbilden. Einzeln betrachtet wäre die Ausprägung dieser Submaßnahme höchstens im Verhalten-Szenario mittel. Da in der Modellierung 3 Submaßnahmen zu einer übergeordneten Maßnahme zusammengefasst wurden und mit unterschiedlichen Anteilen zum selben Ziel beitragen, wird die Maßnahme Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung

Im Bereich Remanufacturing stellen hohe Personalkosten, das komplexe Logistiksystem und die damit einhergehenden Transportaufwendungen und die Rücknahmekanäle, die Remanufacturing-

Standorte und die verfügbaren Vermarktungskanäle effizient vernetzen könnten, große Herausforderungen dar. Die Diffusion der Maßnahme zur Förderung der Wiederverwendung von Komponenten erfordert daher besondere Anstrengungen im Produktions- und Technologiebereich und wird aus diesem Grund dem Szenario „Technologie“ mit mittlerer Ausprägung zugeordnet.

Ebenfalls hängt der Erfolg von den Maßnahmen zur verbesserten Sammlung- und Recyclingquoten von Faktoren, wie bessere Sammelstrukturen, arbeitsintensive Demontageprozesse und Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien ab. Die Maßnahme zu verbesserten Sammlungs- und Recyclingquoten wird mit starker Ausprägung und die Maßnahme zur erhöhten Verwendung von recyceltem Material in den Endgeräten mit mittlerer Ausprägung dem Szenario „Technologie“ zugeordnet.

Bei Rechenzentren spielen sowohl technologische Verbesserungen beim Rechenzentrumsbetrieb als auch die Nachfrage nach umweltfreundlicher Dienstleistung durch die Großverbraucher, z.B. im Rahmen der öffentlichen Beschaffung, eine wichtige Rolle. Daher wird den Szenarien „Technologie“ sowie „Verhalten“ eine starke Ausprägung vermutet.

Modellierungsdaten und Annahmen

Im Folgenden sind die zentralen Daten und Annahmen für die Modellierung der Sektoren IKT und Haushaltsgeräte dargestellt.

Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von Geräten

Für die Modellierung der Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung von IKT- und Haushaltsgeräten wurden die aktuellen und erwartbaren Lebens- und Nutzungsdauer von betrachteten Geräten angenommen. Die aktuellen Angaben zur durchschnittlichen Lebens- und Nutzungsdauer von Geräten wurden aus der Literatur, wie z.B. EU-Ökodesign-Studien, herangezogen. Für die erwartbaren Lebens- und Nutzungsdauer wurden, so weit wie möglich, die Informationen aus den Verbraucherumfragen, wie z.B. die der Stiftung Warentest, ermittelt.

Tabelle 7-12: Aktuelle und erwartbare Lebens- und Nutzungsdauer (in Jahren)

Geräte	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Smartphone	3,00	3,55	7,00	7,00
Tablet	5,00	5,51	9,00	9,00
Notebook	5,00	7,00	10,00	10,00
Desktop-PC	6,00	8,00	12,00	12,00
TV	6,00	8,00	13,00	13,00
Waschmaschinen	12,00	14,00	17,00	17,00
Wäschetrockner	12,00	14,00	17,00	17,00
Geschirrspüler	12,00	14,00	17,00	17,00
Kühl- und Gefriergeräte	12,00	14,00	17,00	17,00

Die Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. die Häufigkeit von Reparaturen wurde aus vorhandenen Studien sowie durch die Datenerhebung bei Reparaturnetzwerken und -betrieben berechnet. Für die Haushaltsgeräte stellte zum Beispiel das österreichische Reparaturzentrum, R.U.S.Z – Verein zur Förderung der Sozialwirtschaft, aktuelle Daten zum Reparierbedarf und Gewichtsangaben von einzelnen Komponenten, zum Zeitpunkt des Auftretens des ersten Defektes sowie zu Reparaturkosten zur

Verfügung. Insgesamt wurde die Modellierung konservativ zugunsten von kurzlebigeren Geräten durchgeführt, in dem die Häufigkeit der Reparaturen mit dem steigenden Alter der Geräte zunimmt. Allerdings ist davon auszugehen, dass die langlebigen Geräte einen geringeren Reparaturbedarf haben, da sie hochwertiges Design und robustere Bauteile verwenden. Bei kurzlebigeren Geräten sind geringere Häufigkeiten von Reparaturen auch darauf zurückzuführen, dass sie in vielen Fällen durch neue Geräte ersetzt, statt repariert zu werden.

Tabelle 7-13: Häufigkeit der Reparatur von Komponenten (in % im Laufe der angenommenen Lebens- und Nutzungsdauer)

Geräte	Komponente	Häufigkeit der Reparatur (%)			
		Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten (2045)	Mix (2045)
Smartphone	Akku	6 %	12 %	40 %	40 %
	Display	6 %	12 %	40 %	40 %
	Kamera/Audio/Lautsprecher	3 %	6 %	20 %	20 %
Tablet	Akku	6 %	12 %	40 %	40 %
	Display	6 %	12 %	40 %	40 %
	Kamera/Audio/Lautsprecher	3 %	6 %	20 %	20 %
Notebook	Akku	6 %	20 %	40 %	40 %
	Arbeitsspeicher	6 %	20 %	40 %	40 %
	Solid State Drive (SSD)	3 %	10 %	20 %	20 %
Desktop-PC	Festplattenlaufwerk	9 %	18 %	35 %	35 %
	Arbeitsspeicher	9 %	18 %	35 %	35 %
	Netzteil	5 %	10 %	20 %	20 %
	Optisches Laufwerk	3 %	5 %	10 %	10 %
TV	Hauptplatine	10 %	20 %	40 %	40 %
	LCD-Module	15 %	30 %	60 %	60 %
Waschmaschine	Heizkörper	5 %	9 %	11 %	11 %
	Laugenpumpe	2 %	4 %	6 %	6 %
	Elektronik	5 %	10 %	13 %	13 %
	Einspülkasten	16 %	30 %	38 %	38 %
	Dosiersystem	14 %	27 %	33 %	33 %
Wäschetrockner	Antriebsriemen	21 %	40 %	50 %	50 %
	Flusensiebe	4 %	8 %	10 %	10 %
	Kondensatpumpe	8 %	16 %	20 %	20 %
	Anlaufkondensatoren beim Antriebsmotor	4 %	8 %	10 %	10 %
	Elektronik	4 %	8 %	10 %	10 %
Geschirrspüler	Dichtungen & Gummiteile	15 %	32 %	40 %	40 %
	Ablaufpumpe	4 %	8 %	10 %	10 %
	Siebe	7 %	16 %	20 %	20 %
	Zulaufventile	4 %	8 %	10 %	10 %
	Umwälzpumpe	4 %	8 %	10 %	10 %
	Elektronik	4 %	8 %	10 %	10 %
	Thermostat	14 %	27 %	33 %	33 %

Geräte	Komponente	Häufigkeit der Reparatur (%)			
Kühl- und Gefriergeräte	Scharniere	14 %	27 %	33 %	33 %
	Gefrierfachtür	14 %	27 %	33 %	33 %

Weitere gerätespezifischen Daten, wie z.B. lebenszyklusbezogene Treibhausgasemissionen, Anschaffungskosten usw., wurden aus der Literatur entnommen. Die Daten zur Marktentwicklung (Bestand und Verkaufszahlen) von einzelnen Geräten wurden aus statistischen Datenbanken, wie z.B. Statistisches Bundesamt (Destatis), Statista GmbH usw., entnommen und mit eigenen Abschätzungen ergänzt.

Tabelle 7-14: Herstellungsaufwand, Energieverbrauch & Anschaffungskosten – IKT und Haushaltsgeräte

Geräte	Herstellungsaufwand (kg CO_2-Äq/ Gerät)	Energieverbrauch Nutzungsphase (kWh/ Gerät)			Anschaffungskosten (€)/ Gerät
		Baseline	Verhalten	Technologie	
Smartphone	60	29	67	34	500
Tablet	116	44	79	48	330
Notebook	286,8	151	302	211	650
Desktop-PC	341,2	340,9	681,9	454,6	610
TV	500	886	1920	1182	365
Waschmaschinen	421,4	1204,8	1706,8	1405,6	600
Wäschetrockner	343	1308	1853	1526	615
Geschirrspüler	360	3504	4964	4088	526
Kühl- und Gefriergeräte	441,3	2722,3	3856,6	3176	509,3

Tabelle 7-15: Jährliche Reparaturkosten für die Modellierung von IKT- und Haushaltsgeräten

Geräte	Reparaturkosten (€ pro Jahr)		
	Baseline (2045)	Technologie (2045)	Verhalten / Mix (2045)
Smartphone	6	10,1	17,1
Tablet	3,7	6,8	13,8
Notebook	2,8	6,7	9,4
Desktop-PC	3,4	5,2	6,9
TV	10,5	15,8	19,4
Waschmaschinen	6,1	10,0	10,3
Wäschetrockner	4,5	7,4	7,6
Geschirrspüler	4,5	8,3	8,6
Kühl- und Gefriergeräte	3,5	5,8	5,9

Remanufacturing

Für Remanufacturing waren folgende Daten zentral für die Modellierung:

Tabelle 7-16: Zentrale Modellierungsparameter für Remanufacturing im Bereich IKT und Haushaltsgeräte in Deutschland

Zentrale Modellierungsparameter	Status quo	Baseline/ Verhalten (2045)	Technologie/ Mix (2045)
Umsatz Remanufacturing in Deutschland	8,7 Mrd. € (2017) 43 Mrd. € (2030)		
Anteil Remanufacturing Elektro- und Elektronikgeräte im Gesamtmarkt für Remanufacturing in Deutschland	7 % (2017)		
Umsatz Remanufacturing Elektro- und Elektronikgeräte	0,65 Mrd. € (2017)	0,91 Mrd. €	7,30 Mrd. €
Umsatz Elektrotechnik- und Elektronikindustrie	191 Mrd. € (2019)*	266 Mrd. €	272,07 Mrd. €
Umsatz Remanufacturing von in der Modellierung betrachteten Geräte in Deutschland	0,08 Mrd. € (2019)	0,11 Mrd. €	0,65 Mrd. €
Umsatz der in der Modellierung betrachteten Geräte in Deutschland**	23,98 Mrd. € (2019)	24,18 Mrd. €	24,18 Mrd. €

Quellen: VDI ZRE (2017) bzw. BMWK (2023) für mit (*) markierte Zahl
Hinweis: (**) Gerätespezifische Umsätze (in Mio. €) wurden anhand Verkaufszahlen (nach Statistischem Bundesamt und Statista GmbH) und durchschnittlichen Anschaffungskosten abgeleitet

Verbesserte Sammlung und erhöhte Rückgewinnung von Rohstoffen

Angenommene Sammelquoten für die Modellierung der Maßnahmen zur verbesserten Sammlung und erhöhten Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Endgeräten waren:

Tabelle 7-17: Annahmen für die Modellierung der verbesserten Sammlung und erhöhten Rückgewinnung von Rohstoffen

Geräte	Sammelquote (%)		
	Status quo (2022)	Baseline/Verhalten (2045)	Technologie/ Mix (2045)
Smartphone	10 %	55 %	75 %
Tablet	10 %	55 %	75 %
Notebook	50 %	65 %	75 %
Desktop-PC	40 %	60 %	80 %
TV	45 %	80 %	95 %
Waschmaschinen	41 %	65 %	85 %
Wäschetrockner	41 %	65 %	85 %
Geschirrspüler	41 %	65 %	85 %
Kühl- und Gefriergeräte	41 %	65 %	85 %

Quelle: Eigene Einschätzung.

Ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren

Die Modellierung von Rechenzentren erfolgte anhand folgender Parameter:

Tabelle 7-18: Modellierungsparameter für Rechenzentren

	Status quo (2022)	Status quo-Fortsetzung (2030)	Baseline (2045)	Verhalten (2045)	Technologie/ Mix (2045)
Energiebedarf Rechenzentren in Deutschland (Mrd. kWh/ Jahr), (Hintemann et al. 2022) [38]	19	35	88	62,74	39,1
Verkaufszahl Server pro Jahr (Mio.), (Buchert et al. 2019)	3,10	5,72	14,35	10,25	6,39
Anschaffungskosten Server (€), (Berwald et al. 2015)	2.500 €				
Installationskosten Server (€), (Berwald et al. 2015)	330				
Wartungskosten Server (€ pro Jahr), (Berwald et al. 2015)	180				
Lebensdauer Sever, (Berwald et al. 2015)	4 Jahre				
Herstellungsaufwand Server (kg CO_2-Äq), (UBA 2018a)	812				

Quellen: siehe Tabelle.

Annahmen zur Rohstoffbilanzierung

Allgemein. Der Sektor IKT und Haushaltsgeräte enthält Geräte- und Rechenzentren-spezifische Maßnahmen. Aufgrund der Vielzahl von Produkten und Technologien, die als “Geräte” zusammengefasst werden (s. Tabelle 7-12), wird angenommen, dass alle Rohstoffe, die für den Sektor relevant sind, auch für die Unterkategorie “Geräte” relevant sind. Die zweite Unterkategorie “Rechenzentren” ist technologisch klarer abgrenzbar. Die für Rechenzentren benötigten Rohstoffe wurden nach Buchert et al. (2019) auf die folgenden begrenzt: Gallium, Kupfer, Neodym, Silber, Kobalt, Nickel, Gold, Palladium, Zink und Platin. Für Rohstoffe, die sowohl für Geräte als auch in Rechenzentren verwendet werden, wird angenommen, dass 96 % des IKT- und Haushaltsgerätebedarfs in Geräte und 4 % in Rechenzentren fließen. Diese Verteilung basiert auf den von den Sektorexpert*innen betrachteten Gesamtmassen.

CE-Maßnahmen. Die Maßnahmen Lebens- und Nutzungsdauerverlängerung (Maßnahme 1) wurde rohstoffübergreifend betrachtet, d.h. es wurde angenommen, dass der Bedarf aller für den Sektor relevanten Rohstoffe gleichermaßen zurückgeht. Die Veränderungspotenziale ergeben sich aus dem Produkt der relativen Einsparungen innerhalb des Sektors und den jeweiligen Sektoranteilen. Die von den Sektorexpert*innen zur Verfügung gestellten Referenzwerte für den Bedarfsrückgang sind die für 2045 angenommenen jährlichen Gesamtmaterialbedarfe der betrachteten Produktgruppen.

[38] Der Energiebedarf für Rechenzentren bis 2030 wurde aus der Studie (https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/10.02.22-studie-rechenzentren.pdf) entnommen und anschließend anhand einer Trendlinie bis 2045 abgeschätzt.

Zur Quantifizierung der ressourceneffizienten Nutzung von Rechenzentren (Maßnahme 4) wurden die Reduktion des Gesamtmaterialbedarfs für Rechenzentren als Proxy für die Rohstoffe verwendet, die für Rechenzentren als relevant genommen wurden. Die Veränderungspotenziale ergeben sich in diesem Fall als Produkt der relativen Einsparung des Gesamtmaterialbedarfs der Rechenzentren, dem angenommen Anteil der Rechenzentren am Sektor (4 %) und den jeweiligen Sektoranteilen der Rohstoffe.

Die Bewertung der Maßnahme Erhöhte Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen (Maßnahme 3) wurden rohstoffspezifisch vorgenommen. Die Materialeinsparungen wurden als Massen (in t bzw. t/a) angegeben. Die Veränderungspotenziale ergeben sich aus dem Quotienten der eingesparten bzw. mehrrecycelten Materialmassen und dem deutschen Gesamtverbrauch.

Remanufacturing (Maßnahme 2) wurde von den Sektorexpert*innen als geringfügig eingeschätzt und nicht quantifiziert.

7.2.4 Ernährung und Lebensmittel

Überlegungen zu einem zukünftigen Ernährungssystem im Kontext der Circular Economy

Die Betrachtung im Handlungsfeld Ernährung erfolgt im Rahmen eines sogenannten Backcasting-Ansatzes. Zunächst wird dabei geklärt, welches Zielstadium im Handlungsfeld in Hinblick auf eine Circular Economy erreicht werden soll. Als Leitbild der Circular Economy im Bereich Ernährung und Lebensmittel wird eine Ernährungsweise bzw. ein Ernährungssystem definiert, welches eine hochwertige, vielfältige und gesunde Ernährung der Bevölkerung erlaubt und gleichzeitig sicherstellt, dass die Bereitstellung der dafür nötigen Lebensmittel innerhalb der Grenzen globaler, ökosystemarer Tragfähigkeiten operiert. Hier kam dem Vorschlag der sogenannten „Planetary Health Diet“ der EAT-Lancet Kommission (vgl. Willett et al. (2019) in den letzten Jahren eine hohe Aufmerksamkeit zu. Der Vorschlag der Planetary Health Diet umreißt eine global skalierbare Ernährungsweise, die sowohl erlauben soll, ernährungsphysiologische Grundbedürfnisse zu befriedigen als zugleich auch planetare Belastungsgrenzen einzuhalten. Für die vorliegende Studie wird davon ausgegangen, dass eine Ernährung die diesen Anforderungen genügt auch anschlussfähig an das Konzept einer Circular Economy für Deutschland ist.

Festlegungen und Annahmen zu verschiedenen Ernährungsweisen

Die globale Planetary Health Diet nach Empfehlungen von Willett et al (2019), wird für das vorliegende Vorhaben auf eine für die Ernährungssituation in Deutschland und eine entsprechend angepasste Ernährungsweise konkretisiert. Hierzu wird auf einschlägige Vorarbeiten des WWF – konkret die Modellierungen im Zuge des Projekts „So schmeckt Zukunft – ein kulinarischer Kompass“ (Dräger de Teran 2021) zurückgegriffen werden. Im genannten Projekt wurden drei denkbare Ernährungsstile definiert, die laut Aussage der Autoren den Anforderungen der Planetary Health Diet entsprechen sollen. Konkret wird in der Studie aufgezeigt, welches Einsparpotenzial besteht, wenn von der derzeitigen durchschnittlichen Ernährung auf eine an „PHD-konforme“ Ernährungsweise umgestellt wird. Die Autor*innen nutzen für die Berechnung von Eisparpotenzialen folgende vier Ernährungsweisen:

- **Derzeitige** Ernährungsweise (nicht PHD konform)
- **Flexitarische** Ernährungsweise (PHD konform)
- **Vegetarische** Ernährungsweise (PHD konform)
- **Vegane** Ernährungsweise (PHD konform)

Für jeden der vier Ernährungsstiele wurden entsprechende Lebensmittel-Warenkörbe definiert, in denen die Art und Menge des Konsums pro Kopf und Jahr zusammengestellt wird (siehe Abschnitt Modellierungsdaten und Annahmen unten). Die Warenkörbe beschreiben jeweils für den jeweiligen Ernährungsstiel eine vollwertige Ernährung anhand ausgewählter Nahrungsmittel. Tabelle 7-19 sind die Warenkörbe nach Dräger de Teran (2021) aufgelistet.

Tabelle 7-19: Konsummenge der vier Ernährungsweisen pro Kopf und Jahr (kg)

	Status quo Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)	Flexitarischer Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)	Vegetarischer Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)	Veganer Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)
Getreide	**107,52**	**100,1**	**96,44**	**96,44**
Reis	5,29	4,92	4,74	4,74
Weizenmehl	9,78	9,1	8,77	8,77
Backwaren Weizen	64,57	60,08	57,89	57,89
Teigwaren Weizen	8,09	7,52	7,25	7,25
Roggenmehl	1,23	1,15	1,11	1,11
Backwaren Roggen	8,73	8,12	7,82	7,82
Haferflocken	3,21	2,99	2,88	2,88
Mais	2,9	2,7	2,6	2,6
Kartoffelstärke	3,73	3,51	3,39	3,39
Wurzeln oder stärkehaltige Gemüse	**37,28**	**25,18**	**27,19**	**43,78**
Kartoffeln	37,28	25,18	27,19	43,78
Gemüse	**109,49**	**151,14**	**163,24**	**282,77**
dunkelgrünes Gemüse	***18,03***	***58,71***	***63,4***	***94,26***
Brokkoli	3,59	11,67	12,61	34,52
Spinat	2,51	8,18	8,83	19,2
Gurken	11,93	38,85	41,96	40,54
rotes & oranges Gemüse	***67,45***	***55,5***	***59,94***	***94,26***
Tomaten	50,15	43,8	47,3	70,08
Karotten	17,3	11,7	12,64	24,18
anderes Gemüse	***24,01***	***36,94***	***39,9***	***94,26***
Kohl	8,34	13,63	14,72	32,72
Zwiebeln	15,67	23,31	25,17	61,54
Obst	**104,16**	**100,19**	**108,2**	**137,89**
Äpfel	33,3	35,58	38,43	44,05
Pfirsiche	6,54	7,57	8,18	8,66
Trauben	9,19	7,19	7,77	12,16
Bananen	20,45	12,62	13,63	27,05
Orangen	33,25	36,95	39,9	43,98
Rosinen	1,19	0,21	0,23	1,65
Datteln	0,24	0,05	0,06	0,34

Fortsetzung nächste Seite

	Status quo Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)	Flexitarischer Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)	Vegetarischer Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)	Veganer Warenkorb Konsummenge pro Kopf und Jahr (kg)
Milchprodukte	**123,47**	**79,54**	**85,9**	**0**
Milch	51,47	41,14	44,44	0
Joghurt	29,87	32,51	35,11	0
Sahne	5,82	1,02	1,1	0
Butter	5,93	0,41	0,44	0
Käse	24,21	3,29	3,56	0
Milchpulver	4,94	0,51	0,55	0
Kondensmilch	1,22	0,65	0,7	0
Proteinquellen	**81,77**	**126,23**	**104,05**	**108,02**
Fleisch & Wurst	*55,35*	*30,05*	*0*	*0*
Rind	7,52	6,29	0	0
Schwein	11,21	6,29	0	0
Geflügel	8,22	9,98	0	0
Wurst**	28,4	7,49	0	0
Eier	**12,92**	**5,65**	**5,84**	**0**
Fisch	***6,47***	***9,38***	***0***	***0***
Hülsenfrüchte	***3,85***	***71,18***	***87,79***	***97,61***
Erbsen	1,92	40,06	40,06	40,06
Bohnen	0,34	7,07	7,07	7,07
Tofu	0	0	10,32	20,64
Erdnüsse	1,59	24,05	30,34	29,84
Nüsse	**3,18**	**9,96**	**10,41**	**10,41**
Mandeln	1,2	3,75	3,92	3,92
Haselnüsse	0,83	2,6	2,72	2,72
Cashewnüsse	0,62	1,94	2,02	2,02
Walnüsse	0,54	1,68	1,76	1,76
zugesetzte Fette	**21,58**	**18,2**	**19,78**	**19,78**
Palmöl	4,76	2,68	2,68	2,68
Olivenöl	0,91	0,84	0,93	0,93
Rapsöl	6,19	5,71	6,3	6,3
Sonnenblumenöl	4,34	4,01	4,42	4,42
Sojaöl	5,37	4,95	5,46	5,46
zugesetzte Zucker	**29,03**	**11,84**	**11,84**	**11,84**
Zucker	29,03	11,84	11,84	11,84
Sonstige	**2,8**	**2,79**	**2,79**	**2,79**
Kakao	2,8	2,79	2,79	2,79
Summe	617,4	615,3	619,3	703,3

Quelle: Eigene Darstellung; (Dräger de Teran 2021)

Die Status quo-Ernährungsweise beinhaltet unter anderem einen jährlichen Fleischkonsum von mehr als 55 kg pro Person. Bei der PHD-konformen flexitarischen Ernährungsweise sinkt der Fleischkonsum um rund 20kg auf 30,05 kg pro Person und Jahr. Die vegetarische Ernährungsweise beinhaltet weder Fleisch noch Fisch und der Warenkorb für vegane Ernährungsweise verzichtet vollständig auf Lebensmittel tierischen Ursprungs. Wichtig ist hierbei anzumerken, dass alle drei Ernährungsstile so definiert wurden, dass sie laut den Autor*innen die ernährungsphysiologischen Bedürfnisse der deutschen Durchschnittbevölkerung in vergleichbar guter Weise zu decken in der Lage sind.[39]

Festlegungen und Annahmen im Kontext Lebensmittelverluste

Lebensmittelverluste treten in allen Wertschöpfungsstufen auf. Um einen Ist-Zustand der Lebensmittelabfälle darzustellen, wurde für die vorliegende Studie auf Daten zu Lebensmittelverlusten entlang verschiedener Wertschöpfungsstufen aus der Studie von Noleppa und Cartsburg (2015) zurückgegriffen. Noleppa und Cartsburg (2015) teilen Lebensmittelverluste in vermeidbare Lebensmittelverluste und Lebensmittelverluste gesamt ein. Unter vermeidbaren Lebensmittelverlusten werden Verluste verstanden, die durch eine Optimierung der Prozessschritte und Verhaltensänderungen (z.B. der Konsumierenden) vermieden werden können. Bei den verbleibenden, als unvermeidbar eingestuften Lebensmittelverlusten handelt es sich um Atmungs-, Kühl-, Koch-, Säuberungs- und Schnittverluste (inklusive Knochen), welche mit aktuell verfügbaren Technologien nicht vermieden werden können. Tabelle 7-20 zeigt die in der Studie von Noleppa und Cartsburg (2015) berücksichtigten Lebensmittelverluste entlang verschiedener Wertschöpfungsstufen und jeweils ausgedrückt in Prozent.

Tabelle 7-20: Lebensmittelverluste der Wertschöpfungsstufen in %

	Ernte- und Nachernteverluste		Prozessverluste		Verteilungsverluste		Konsumverluste	
Nahrungsmittel	insg.	vermeidbar	insgesamt	vermeidbar	insgesamt	vermeidbar	insgesamt	vermeidbar
Fleisch	1	0	5,2	0,2	3	2,1	16	7,7
Milch	1	0	4	0,7	1,5	1,4	14	12,7
Eier	1	0	4	0,7	1,5	1,4	16	14,6
Getreide	6	0	5,5	1,3	4,5	4,1	23	20,2
Hülsenfrüchte	5,5	0	4,7	0,8	2,8	2,5	19	15,2
Kartoffeln	8	0	7,2	0,3	7	6,3	26	17,4
Zucker	8	0	7,2	0,3	7	6,3	15	13,1
Gemüse	7	0	3,8	0,4	7	6,3	26	11,9
Obst	8	0	3,8	0,4	7	6,3	24	10,8
pflanzliche Öl	4	0	3,8	0,3	1	0,9	15	10,1

Quelle: Eigene Darstellung; (Dräger de Teran 2015)

[39] Dies ist eine wesentliche Grundforderung, die in Hinblick auf die funktionelle Äquivalenz der Ernährungsstile an den im Hintergrund durchgeführten ökobilanziellen Vergleich zu stellen ist. Die tatsächliche funktionelle Äquivalenz wird hier jedoch mangels verfügbarer Kapazitäten nicht noch einmal im Detail untersucht bzw. nicht geprüft. Für die vorliegende Auswertung wird daher lediglich angenommen, dass sie als gegeben angesehen werden kann

Noleppa und Cartsburg (2015) treffen in ihrer Studie keine Aussage zu Lebensmittelverlusten von Nüssen, Kakao und Fisch. Daher wurde für die vorliegende Studie vereinfachend angenommen, dass die Lebensmittelverluste von Nüssen und Cacao den von Hülsenfrüchten entsprechen und dass die Lebensmittelverluste bei Fisch gleich sind wie bei Fleisch.

Insgesamt ist bei den Festlegungen und Annahmen im Kontext Lebensmittelverluste jedoch zu beachten, dass die Datenlage für eine belastbare Bestimmung von Lebensmittelverlusten, z.B. in Form eines Monitorings, in Deutschland noch weitgehend fehlt. Entsprechend sind die hier getroffenen Festlegungen als orientierende Abschätzung zu sehen und die Ergebnisse entsprechend zu interpretieren.

Aus Sicht der Modellierung, wird der Verlust an Lebensmitteln entlang der Wertschöpfungskette in der vorliegenden Studie als zusätzlicher Produktionsaufwand betrachtet, der den konsumierten Lebensmitteln noch hinzugerechnet werden muss.

Festlegungen und Annahmen für die Rohstoffbilanzierung

Auf Grundlage der von den Sektorexpert*innen erarbeiteten Warenkörbe wurden die Bedarfe der Lebensmittelsektor-relevanten Rohstoffe abgeschätzt. Die Rohstoffe wurden nach deren Anwendung in zwei Gruppen eingeteilt. Der Rohstoff-Gruppe 1 wurden die Rohstoffe zugeordnet, die für alle Lebensmittel z.B. als Düngemittel relevant sind. Zur Rohstoff-Gruppe 2 wurden die Rohstoffe gezählt, die als Futtermittel eingesetzt werden, und daher vorrangig die Produktion von tierischen Produkten betreffen. Die Einteilung wurde wie folgt getroffen:

- Gruppe 1 (alle Lebensmittel): Borate, Phosphate (83 % Sektoranteil als Düngemittel), Selen, Zink;
- Gruppe 2 (tierische Lebensmittel): Phosphate (10 % Sektoranteil als Futtermittel), Bismut.

Als Proxy diente für die Rohstoffe der Gruppe 1 die Reduktion des Anbauflächenbedarfs. Dabei wird angenommen, dass der Einsatz von Düngemittel proportional zum Flächenverbrauch zurückgeht. Die benötigte Anbaufläche wurde für die jeweiligen Warenkörbe aus den nahrungsmittelspezifischen, unbewerteten Flächennutzung pro Kilo Nahrungsmittel (ADEME, Agribalyse 3 mit der Wirkungsabschätzungsmethode Landnutzung von Selective LCI results) bestimmt.

Für die Rohstoffe der Gruppe 2 wurde die Gesamtfuttermenge der jeweiligen Warenkörbe als Proxy verwendet. Dabei wird angenommen, dass mineralische Futtermittel linear von der Gesamtfuttermenge abhängen. Die zugrundeliegenden Werte sind Futtermengen pro Kilogramm Nahrungsmittel (IINAS).

Die Veränderungspotenziale ergeben sich als Produkt aus der relativen Reduktion von Flächennutzung (Rohstoff-Gruppe 1) bzw. des Futtermittelbedarfs (Rohstoff-Gruppe 2) und den Sektoranteilen der jeweiligen Rohstoffe.

Ökobilanzierung der Ernährungsstile

Im Zuge ökobilanzieller Betrachtungen wurden die potenziellen Umweltwirkungen der vier im voranstehenden Abschnitt definierten Ernährungsstile bilanziert und miteinander verglichen. Mit den Angaben zur mengenmäßigen Zusammensetzung der Warenkörbe der derzeitigen durchschnittlichen Ernährung und der drei dem Zielbild der PHD entsprechenden Ernährungsstile steht ein für die Quantifizierung der potenziellen Umweltentlastungen der im Handlungsfeld Ernährung betrachteten Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel zur Verfügung.

Wichtig ist hier noch anzumerken, dass unterschiedliche Ambitions- oder Zielerreichungsgrade in der vorliegenden Studie nicht durch Änderungen bei den Ernährungsstilen selbst, sondern über deren jeweiligen Anteil am „Ernährungsstilmix“ abgebildet werden. Dies erlaubt es

- Für die Untersuchung jeweils ernährungsphysiologisch „funktionale“ bzw. funktional äquivalente Ernährungsstile zu vergleichen.
- Zu berücksichtigen, dass die Wahl der konsumierten Lebensmittel grundsätzlich Gegenstand auch individueller Entscheidung der Verbraucher*innen bzw. der Haushalte ist und es in der Zukunft wie auch heute definitiv einen Mix an verschiedensten Ernährungsweisen geben wird.

Mit dem bis hierhin beschriebenen Ansatz ist es möglich, sowohl die beabsichtigte Veränderung von Ernährungsstilen als auch die potenziellen Umwelteffekte durch Vermeidung von Lebensmittelabfällen abzubilden bzw. grob abzuschätzen. Wichtig ist hier sich klarzumachen, dass die Wirkung von Maßnahmen in diesen beiden Feldern auf der Bewertung entweder einer direkten oder indirekten Substitution oder auf der Bewertung einer Reduktion der gekauften, bzw. über die Wertschöpfungskette hinweg nachgefragten Menge an Lebensmitteln beruht. Letzteres führt im Sinne eines einheitlichen Wirkmodells also zu einem geringeren Bedarf an produzierten Lebensmitteln. Der potenzielle negative (ggf. auch positive) Umwelteinfluss bei der Bereitstellung von Lebensmitteln wird hier als „konstant“ angenommen. Entlastungseffekte, etwa durch Umstellung der Produktionsverfahren auf ökologischere Alternativen bleiben hier also zunächst unberücksichtigt. Aspekte der landwirtschaftlichen Produktionsweise bzw. Maßnahmen zur potenziellen Änderung der derzeitigen landwirtschaftlichen Produktionsweise sind damit im vorliegenden Modell bislang nicht abgebildet.

In der vorliegenden Studie wird die potenzielle Umweltbelastung der verschiedenen Ernährungsstile über das spezifische Umweltprofil der jeweiligen Lebensmittel ermittelt und entsprechend der konsumierten Menge zu einem ernährungsstilspezifischen Umweltbelastungspotenzial aufsummiert. Als Grundlage für das Umweltprofil der Lebensmittel wurde auf Datensätze aus dem Inventar der Datenbank Agribalyse zurückgegriffen, da diese eine große Bandbreite and Agrarprodukten und Lebensmitteln bereithält und somit eine entsprechend konsistente Zuordnung der Lebensmittel in den verschiedenen Warenkörben erlaubt. Gleichwohl ist hier anzumerken, dass die potenziellen Umweltbelastungen, die mit der Produktion von Lebensmitteln einhergehen, grundsätzlich innerhalb teilweise erheblicher Bandbreiten schwanken können. Entsprechend hat auch die Festlegung auf die der Berechnung zugrunde liegenden Datenbasis einen erheblichen Einfluss auf die Abschätzung ernährungsbedingter Umweltbelastungspotenziale. So konnte im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse gezeigt werden, dass bei Modellierung derselben Mengenströme auf Basis von Umweltprofilen aus der Datenbank ecoinvent zum Teil um Faktor 1,5 höhere Absolutwerte abgeschätzt wurden. Entsprechend größer sind in diesem Fall dann auch die Effekte durch die modellierten CE-Maßnahmen. Datenbank einen Einfluss auf die Ergebnisse (vgl. Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse in Abschnitt 4.1.2.4)

CE-Maßnahmen

Tabelle 7-21: CE-Maßnahmen Lebensmittel und Landwirtschaft

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1	Förderung einer stärker pflanzenbetonten Ernährungsweise (u.a. durch pflanzliche Fleischalternativen)	Reduzierung des Fleischkonsums durch eine Ernährungsumstellung auf eine PHD-Konforme Ernährung in Deutschland. Es wird angenommen, dass sich der Fleischkonsum in Deutschland bis 2045, auf die von Eat-Lancet vorgeschlagenen Konsummenge reduziert, wobei der Mittelwert der von EAT-Lancet empfohlenen Bandbreite an Fleisch genutzt wird.	Reduce

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
2	Reduzierung des Fleischkonsums durch eine Substitution von Fleisch durch synthetische Fleischprodukten.	Auch hier wird von einer Reduktion des Fleischkonsums durch eine Ernährungsumstellung auf eine PHD-Konforme Ernährung in Deutschland ausgegangen. Auch angesichts bestehender Unsicherheiten zur zukünftigen Entwicklung der eingesetzten Prozesse und Verfahren wird angenommen, dass sich ab dem Jahr 2030 schrittweise auch Personen auf eine auf synthetischem Fleisch basierende Ernährung umstellen.	Refuse, Reduce
3	Reduzierung der vermeidbaren Lebensmittelabfälle im Haushalt und der Rohwarenproduktion bis Distribution.	Es wird angenommen, dass sich die vermeidbaren Lebensmittelabfälle im Haushalt und in der Rohwarenproduktion, Herstellung und Distribution bis zum Jahr 2045 um 50 % reduzieren.	Reduce

Quelle: Eigene Zusammenstellung; Anmerkung: Die Maßnahmen 3 und 4 werden in der Ergebnisdarstellung zusammengefasst.

Maßnahmen und Maßnahmenausprägung im Kontext der PHD-konformen Änderung von Ernährungsstilen

Der Konsum tierischer Produkte und insbesondere der Fleischkonsum stellt einen bedeutenden Hebel für eine Reduktion ernährungsbedingter Umweltbelastungen dar. Laut derzeit verfügbaren Informationen zeigt sich in Deutschland in den letzten Jahren ein stabil-rückläufiger Trend beim Fleischkonsum.

Ausprägung der Maßnahmen im Baseline-Szenario

Entsprechend der Statistiken zur Versorgungsbilanz des BLE (2022) sank der Fleischkonsum in den Jahren von 2015 bis 2020 jährlich um etwa 1,3 %. Im Baseline-Szenario wird angenommen, dass sich dieser Trend zu einer fleischreduzierten Ernährungsweise bis ins Jahr 2045 kontinuierlich fortsetzt. Entsprechend ist auch bereits im Baseline-Szenario ein deutlicher Rückgang des Fleischkonsums pro Kopf und Jahr berücksichtigt. Auf Basis einer linearen Fortschreibung des Trends aus den Jahren 2015-2020 reduziert sich der Fleischkonsum in Deutschland bis 2045 um immerhin 1,3 Mt auf dann neu 3,3 Mt pro Jahr.

Um die jährliche Fleischreduzierung von 1,3 % zu erreichen, wird im Modell angenommen, dass einige Menschen von der fleischbasierten Status quo-Ernährungsweise auf eine fleischreduzierte bzw. stärker pflanzenbetonte Ernährung „umsteigen“. Bezüglich der Umstellung von Ernährungsweisen werden folgende weiteren Annahmen getroffen.

- Beim Wechsel der Ernährungsweise wird vom Status quo-Ernährungsstil in einen der drei anderen PHD-konformen Ernährungsstile gewechselt
- Für den Wechsel der Ernährungsstile wird vereinfachend angenommen, dass von denjenigen Menschen, die ihre Ernährung umstellen, etwa zu 50 % in den fleischreduzierten Ernährungsstil wechseln, und die andere Hälfte zu gleichen Teilen in den vegetarischen und veganen Ernährungsstil wechseln.

Anhand dieser Annahmen ergibt sich folgender Verteilung der Ernährungsweisen in Deutschland von 2020 bis 2045. Die Tabelle zeigt die Anzahl der Personen in Deutschland an, welche sich anhand dieser Ernährungsweise ernähren.

Tabelle 7-22: Mio. Personen je Ernährungsweise im Zeitraum 2020-2045, um eine Reduzierung des Fleischkonsums von 1,3 % zu erreichen

Jahr	Status quo	Fleischreduziert	Vegetarisch	Vegan	Summe
2020	83,15	0	0	0	83,15
2025	75,63	3,93	1,79	1,79	83,15
2030	68,60	7,60	3,47	3,47	83,15
2035	62,03	11,03	5,04	5,04	83,15
2040	55,89	14,24	6,51	6,51	83,15
2045	50,15	17,24	7,88	7,88	83,15

Quelle: Eigene Darstellung

Die Tabelle zeigt die zusätzliche Verteilung der Personen pro Ernährungsweise in 5 Jahresschritten an. Sie zeigt nicht den Ist-Zustand der Verteilung im Jahr 2020 an, da in der Status quo-Ernährung ja eine durchschnittliche aktuelle Ernährungsweise abgebildet wird, bei der bereits Flexitarier, Vegetarier und Veganer mit enthalten sind.

Aufbauend auf der dargestellten Verteilung der sich nach den verschiedenen Ernährungsweisen ernährenden Menschen und der pro Ernährungsweise konsumierten Fleischmenge, lässt sich der absolute Fleischkonsum in Deutschland für die Zeit bis 2045 grob orientierend abschätzen. Tabelle 7-23 führt das Ergebnis der Abschätzung des Fleischkonsums im Baseline-Szenario auf.

Tabelle 7-23: Fleischkonsum Deutschlands je Ernährungsweise in Mt ohne Lebensmittelverluste

Jahr	Status quo	Fleischreduziert	Vegetarisch	Vegan	Summe
2020	4,6	0,0	0	0	4,6
2025	4,2	0,1	0	0	4,3
2030	3,8	0,2	0	0	4,0
2035	3,4	0,3	0	0	3,8
2040	3,1	0,4	0	0	3,5
2045	2,8	0,5	0	0	3,3

Quelle: Eigene Darstellung

Für das Baseline-Szenario kann also festgehalten, dass bei Annahme eines sich fortsetzenden Trends zur Reduktion des Fleischkonsums in Deutschland ein Rückgang um 1,3 Mt Fleisch auf 3,3 Mt im Jahr 2045 ergibt.

Ausprägung der Maßnahmen einer Umstellung nach Vorgaben der Planetary Health Diet:

Die von der Eat Lancet-Kommission zum Verzehr empfohlene Menge an Fleisch umfasst eine Bandbreite von 0 bis 31,4kg pro Jahr. Die fleischreduzierte Ernährungsweise in der Studie von Dräger de Teran (2021) sieht einen jährlichen Pro-Kopf-Konsum von ca. 30 kg Fleisch pro Jahr vor und befindet sich somit am oberen Spektrum der von Eat Lancet empfohlenen Menge Fleisch. In den Empfehlungen von Willet et al, wird ein mittlerer Fleischkonsum von 15,7 kg pro Person und Jahr aufgeführt.

Da der Fleischkonsum ein maßgeblicher Hebel für die ernährungsbedingten Umweltbelastungen darstellt (Dräger de Teran 2021), ergeben sich hier bereits in den Modellierungsannahmen also teils

erhebliche Schwankungsbreiten beim Wert des letztlich einer den Anforderungen der PHD entsprechenden Fleischkonsums. Für die vorliegende Studie wurde angenommen, dass die Ernährung in Deutschland dann PHD-konform ist, wenn der Fleischkonsum nicht höher als 15,7kg pro Kopf und Jahr ist.

In Deutschland lebten 2020 83 Mio. Menschen (Destatis 2022)[40]. Bei einem Pro Kopf Konsum von 15,7 kg und der Einwohnerzahl errechnet sich ein absoluter Fleischkonsum von 1,3 Mt Fleisch pro Jahr, der nicht überschritten werden sollte, wenn die durchschnittliche Ernährung in Deutschland den Empfehlungen der Planetary Health Diet nach EAT Lancet folgt.

Wie bereits beschrieben führt eine lineare Fortschreibung des gegenwärtigen Trends aus den Jahren 2015-2020 zu einer Reduktion des Fleischkonsum in Deutschland, um immerhin 1,3 Mt auf dann neu 3,3 Mt im Jahr 2045. Um den Fleischkonsum im Jahr 2045 auf die aus den Empfehlungen nach EAT Lancet abgeleiteten 1,3 Mt zu reduzieren, muss diese, bei ebenfalls linearer Fortschreibung der jährlichen Fleischreduktion von 1,3 % auf 4,9 % erhöht werden. Daraus ergibt sich ein Delta von 3,6 % oder im Umkehrschluss die Folgerung, dass eine Fortsetzung des gegenwärtigen Trends zu einer deutlichen, allerdings bislang noch nicht ausreichenden Reduktion des Fleischkonsums führt. Bei der Frage der Schlüsseltreiber, die eine zusätzliche Reduktion des Fleischkonsums begünstigen können, liegen derzeit keine belastbaren quantitativen Daten vor. Für die vorliegende Studie wird daher angenommen, dass 70 % der zusätzlich notwendigen Fleischreduzierung auf Maßnahmen im Kontext eine Verhaltensänderung bei den Konsumierenden zurückgeführt werden kann. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die produktionsseitige Bereitstellung eines breiten Angebots hochwertiger pflanzenbasierter Alternativen auch durch die Verbesserung bestehender und die Entwicklung neuer Lebensmittel unterstütz werden kann. Für die Modellierung des Technologie-Szenarios wird also davon ausgegangen, dass die Bereitstellung entsprechender Alternativen mit 30 % zur zusätzlichen Fleischreduzierung beitragen kann.

Zusammenfassend werden in den verschiedenen Szenarien die nachfolgend aufgeführten jährlichen Reduktionen des Fleischkonsums betrachtet:

Baseline-Szenario: Beschreibt die Reduzierung des Fleischkonsums anhand des Trends der letzten Jahre. Fleischkonsum wird jährlich um 1,3 % reduziert.

Technologie-Szenario: Beschreibt die Reduzierung des Fleischkonsums, welche anhand technischer Erneuerungen stattfinden. Fleischkonsum wird jährlich um 2,4 % (1,3 % Baseline + 1,1 % durch zusätzliche technologiespezifische Maßnahmen) reduziert.

Verhalten-Szenario: Beschreibt die Reduzierung des Fleischkonsums anhand von Verhaltensänderungen des Konsumenten. Fleischkonsum wird jährlich um 3,8 % (1,3 % Baseline + 2,5 % durch zusätzliche verhaltensspezifische Maßnahmen) reduziert.

Mix-Szenario: Beschreibt die Reduzierung des Fleischkonsums die durch das Technologie- und das Verhalten-Szenario zusammen erreicht werden. Der Fleischkonsum reduziert sich im ambitionierten Mix-Szenario jährlich um 4,9 % reduziert. Das Einhalten dieses Zielpfades entspräche dem Erreichen einer mit den Empfehlungen einer Planetary Health Diet konformen Ernährung in Deutschland ab dem Jahr 2045.

[40] Es wurde vereinfacht angenommen, dass sich die Bevölkerungszahl in den untersuchten Zeitraum nicht verändert.

Ergänzend zeigt Tabelle 7-24 auf. Welche Verteilung der Ernährungsweisen erreicht werden müssten, um die Reduktion des Fleischkonsums im Mix-Szenario zu erreichen.

Tabelle 7-24: Mio. Personen je Ernährungsweise im Zeitraum 2020-2045, um einen Eat-Lancet konformen Fleischkonsum in Deutschland zu erreichen

Jahr	Status quo	Fleischreduziert	Vegetarisch	Vegan	Summe
2020	83,15	0	0	0	83,15
2025	57,55	13,37	6,11	6,11	83,15
2030	37,66	23,77	10,86	10,86	83,15
2035	22,20	31,85	14,56	14,56	83,15
2040	10,18	38,12	17,42	17,43	83,15
2045	0,84	43,00	19,66	19,66	83,15

Quelle: Eigene Darstellung

Basierend auf den berechneten Konsummengen und vor dem Hintergrund der im Zuge der Modellierung getroffenen Festlegungen und Annahmen können folgende übergeordnete Schlüsse gezogen werden:

- Eine Ernährung entsprechend den fleischkonsumbezogenen Empfehlungen der Planetary Health Diet ist möglich, wird aber durch Fortschreibung des gegenwärtigen Trends (Fleischreduktion um 1,3 % pro Jahr) deutlich verfehlt.
- Eine jährliche Reduktion des Fleischkonsums um knapp 5 % ist vor allem dann darstellbar, wenn nahezu alle Menschen in Deutschland ihren Fleischkonsum ganz oder teilweise reduzieren. So zeigt sich in Tabelle 7-24, dass im ambitionierten Mix-Szenario nur noch knapp 1 Mio. Menschen so ernähren könnten, wie sie dies im Jahr 2020 tun.
- Aus dem aufgezeigten Delta zwischen der Entwicklung im Baseline-Szenario und dem ambitionierten Mix-Szenario zeigt sich deutlich der Bedarf weiterer, über die bereits bestehenden Maßnahmen und Instrumente hinausreichenden Aktivitäten.

Es ist offenkundig, dass die hier vorgestellten, grob überschlägigen Berechnungen, die zudem einen erheblichen Prognosezeitraum von mehr als 25 Jahren reichen, notwendig mit Unsicherheiten behaftet sind. Zugleich zeigt sich jedoch deutlich der klare Bedarf sowohl durch produktionsseitige als auch konsumseitige Anreize zu der zukünftig erforderlichen Veränderung des Konsums von Lebensmitteln beizutragen.

Maßnahmen und Maßnahmenausprägungen im Kontext einer Substitution von Fleisch durch synthetische Fleischalternativen

Im Folgenden wird beschrieben, wie eine teilweise Substitution von Fleisch durch synthetische Fleischalternativen die ernährungsbedingten Umweltbelastungen beeinflussen könnte. Für die Modellierung dieser Maßnahme wird davon ausgegangen, dass der im entsprechenden Jahr in der Status quo noch verbleibende Fleischkonsum ab dem Jahr 2030 schrittweise durch synthetische Fleischalternativen substituiert wird. Derzeit sind synthetisches Fleischprodukte Gegenstand anwendungsnaher Forschungs- und Entwicklungsvorhaben. Allerdings haben sich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie bislang keine entsprechenden Produkte am Markt etabliert bzw. durchgesetzt. Der Zeitpunkt zum Erreichen der Marktreife entsprechender Produktionstechnologien könnte aber in den kommenden Jahren erfolgen. Für die vorliegende Studie wird angenommen, dass entsprechende Produkte angesichts der noch notwendigen technologischen und marktlichen Entwicklungen

erst ab dem Jahr 2030 in einem zunächst auch begrenzten Umfang auf die Ernährung in Deutschland Einfluss nehmen.

Die Modellierung der Maßnahme fußt auf folgenden Annahmen. Der auf synthetischen Fleischalternativen basierende Ernährungsstil unterscheidet sich von der Status quo-Ernährung nur beim Fleischkonsum. Bei der auf In-vitro-Fleischprodukten basierenden Ernährung wird der gesamte Fleischkonsum durch In-vitro-Fleisch ersetzt.

Tabelle 7-25 zeigt auf wie sich die Ernährungsweisen verteilen müssen, um den Trend von einer Fleischreduzierung von 1,3 % pro Jahr zu halten. Zusätzlich zum bereits weiter oben beschriebenen Baseline-Szenario wird hier jedoch ein teilweiser Wechsel von Personen aus der Status quo-Ernährung zu einer auf In-vitro-Fleischprodukten basierenden Ernährung abgebildet. Dabei wird davon ausgegangen, dass zunächst in den Jahren 2030 und 2035 jeweils 2,5 % der Personen umsteigen und im Jahr 2040 dann 5 % umgestiegen sind. Für das Jahr 2045 wird von weiteren 5 % Zuwachs ausgegangen sodass für das Jahr 2045 davon ausgegangen wird, dass insgesamt 15 % der Menschen in Deutschland auf eine aus synthetischen Fleischprodukten basierende Ernährung umgestellt haben.

Tabelle 7-25: Zuwachs der fleischreduzierten, in vitro, vegetarischen und veganen Ernährungsweisen in Personen bis 2045

Jahr	Status quo	In vitro	Fleischreduziert	Vegetarisch	Vegan	Summe
2020	83.155.031	0	0	0	0	83.155.031
2025	73.360.844	0	7.979.565	907.311	907.311	83.155.031
2030	62.602.652	1.605.196	15.436.736	1.755.223	1.755.223	83.155.031
2035	52.871.363	2.782.703	22.405.713	2.547.626	2.547.626	83.155.031
2040	42.894.244	4.766.027	28.918.456	3.288.152	3.288.152	83.155.031
2045	34.161.330	6.028.470	35.004.832	3.980.199	3.980.199	83.155.031

Quelle: Eigene Darstellung

Bei der Frage der zukünftigen Rolle von synthetischen Fleischalternativen werden neben technischen und ökonomischen Aspekten absehbar auch und verhaltens- bzw. akzeptanzbedingte Aspekte relevant sein. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist allerdings kaum belastbar abzuschätzen, wie stark welcher Aspekt in Zukunft wirksam wird. Für die vorliegende Studie wird davon ausgegangen, dass Effekte zu gleichen Teilen auf technische Erneuerungen und auf Verhaltensänderung zurückzuführen sind. Die Maßnahme einer Umstellung auf In-vitro-Fleisch wird nicht in allen Szenarien der vorliegenden Studie betrachtet:

Baseline-Szenario: Fleischkonsum wird jährlich um 1,3 % reduziert. keine Berücksichtigung der Maßnahme

Technologie-Szenario: Fleischkonsum wird analog zum Baseline-Szenario jährlich um 1,3 % reduziert. Zusätzlich stellen ab dem Jahr 2030 schrittweise Menschen auf eine auf synthetischen Fleischalternativen beruhende Ernährung um. Im Technologie-Szenario wechseln bis 2045 insgesamt 7,5 % der Menschen aus der Status quo-Ernährung auf eine auf synthetischen Fleischalternativen beruhende Ernährung um.

Verhalten-Szenario: Fleischkonsum wird analog Baseline-Szenario jährlich um 1,3 % reduziert. Zusätzlich stellen ab dem Jahr 2030 schrittweise Menschen auf eine auf synthetischen Fleischalterna-

tiven beruhende Ernährung um. Im Verhalten-Szenario wechseln bis 2045 ebenfalls 7,5 % der Menschen aus der Status quo-Ernährung auf eine auf synthetischen Fleischalternativen beruhende Ernährung um.

Mix-Szenario: Fasst die Effekte des Technologie-Szenarios und des Verhalten-Szenarios zusammen. Im Mix-Szenario wechseln demnach bis 2045 insgesamt 15 % der Menschen aus der Status quo-Ernährung in eine In-vitro-Fleisch-basierte Ernährung.

Die potenziellen Umweltauswirkungen bei der Herstellung von synthetischen Fleischalternativen Fleisch sind auf Basis aktuell vorhandener Informationen nur mit großen Unsicherheiten abzuschätzen. Für die vorliegende Studie wurde die Herstellung entsprechender Produkte auf Basis von LCI-Inventardaten aus der Studie von Smetana et al. (2015) bilanziert.

Tabelle 7-26: In-vitro-Fleisch Sachbilanz

Komponente	Menge	Einheit
Urea	1	kg
Strom	96	MJ
Wasser	420	kg
LKW-Transport	110	kg/km

Quelle: Smetana et al (2015); Eigene Darstellung

Wichtig ist hier anzumerken, dass für die Modellierung des Strombedarfs eine Zusammensetzung auf Basis eines prognostizierten zukünftigen Strommixes für das Jahr 2040 angenommen wurde, der zwar weitgehend, jedoch nicht vollständig, auf erneuerbaren Energien beruht (Repenning et al. 2021).

Maßnahmen und Maßnahmenausprägungen im Kontext der Reduktion vermeid-barer Lebensmittelabfälle

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die Maßnahmen zur Reduzierung der Lebensmittelabfälle entlang der Wertschöpfungskette und bei den Konsumierenden modelliert wurde.

Die Vereinten Nationen haben sich mit dem Sustainable Development Goal (SDG) 12.3 darauf geeinigt die Lebensmittelabfälle weltweit zu reduzieren. Das SDG 12.3 zielt darauf ab, bis 2030 die Lebensmittelabfälle pro Kopf im Handel und auf Konsumentenebene um 50 % zu reduzieren. Darüber hinaus ist vorgesehen, die Lebensmittelabfälle entlang der Produktions- und Lieferkette, einschließlich Verlusten nach der Ernte, zu verringern.

Deutschland hat sich mit der Nationalen Strategie zur Reduzierung der Lebensmittelverschwendung dem Ziel der Vereinten Nationen verpflichtet, die Lebensmittelverschwendung auf Handels- und Verbraucherebene zu halbieren und die Lebensmittelabfälle entlang der Produktions- und Lieferkette, einschließlich Nachernteverluste, zu verringern (BMEL 2019). Im Koalitionsvertrag von 2018 bekennen sich die Regierungsparteien zum Ziel des SDG 12.3.

In der vorliegenden Studie wurde die Reduzierung der Lebensmittelabfälle in folgende Szenarien betrachtet:

Baseline-Szenario: Beschreibt den Status quo. Lebensmittelabfälle werden bis 2045 nicht reduziert.

Technologie-Szenario: Beschreibt die Reduzierung der vermeidbaren Lebensmittelabfälle von der Ernte bis zur Distribution um 50 %.

Verhalten-Szenario: Beschreibt die Reduzierung der vermeidbaren Lebensmitteabfälle beim Konsumenten um 50 %.

Mix-Szenario: Beschreibt die Reduzierung der Lebensmitteabfälle, wenn sowohl die Reduktion im Technologie- als auch die Reduktion im Verhalten-Szenario erreicht werden kann.

7.2.5 Textilien

CE-Maßnahmen und deren Ausprägung in den Szenarien

Tabelle 7-27: CE-Maßnahmen Textilien

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1	Maßnahmenbündel zur Förderung einer längeren Nutzungsdauer bereits vorhandener Textilien.	Ziel ist eine Stärkung verhaltensbasierter Suffizienz im Konsum von Textilien. In Kombination mit Ermöglichung einer verstärkten Wieder- bzw. Weiterverwendung bereits im Besitz der Konsument*innen befindlicher Textilien bewirkt diese Maßnahme eine Reduktion des Konsums neuer Textilien um 10 % der Status quo-Menge.	Refuse, Rethink, Reduce, Reuse
2	Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen z.B. Sharing Economy bzw. Product-as-a-Service	Ziel ist die Verringerung des Konsums neuer Textilien durch private Haushalte und gewerbliche Nutzende um 10 % der Status quo-Menge. Mit Hilfe gewerblich organisierter Dienstleistungsangebote soll die Nutzungsintensität, die Lebensdauer und die Reparaturmöglichkeiten von Textilien verbessert werden. Dies ermöglicht eine Substitution neuer Textilien durch vorhandene mit längerer Lebensdauer.	Rethink, Reduce, Reuse
3	Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung (Incl. Reparatur)	Maßnahmenbündel zur Verbesserung der Erfassung gebrauchter Textilien aus Privathaushalten und gewerblichen Anwendern; Förderung der technischen und logistischen Innovation für die Sortierung und Wiederaufbereitung von gebrauchten Textilien zum Zwecke der Wiederverwendung im inländischen Second-Hand Markt (Kaskadennutzung als nachrangige Option)	Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture,
4	Förderung des Faser-zu-Faser (F2F) Textilrecyclings	Förderung der technischen und logistischen Innovation für die Sortierung, Separierung und Rückgewinnung von Textilfasern auf werkstofflicher Ebene. Dazu gehören auch Anreize zum industriellen Wiedereinsatz rezyklierter Textilfasern in der Produktion neuer Textilien. Chemisches Recycling (insb. Hydrolyse) von Chemiefasern wurde hier nicht betrachtet, weil diese Technologie aktuell im Textilrecycling noch nicht einsatzbereit ist und dessen Einsatz bis 2045 zu ungewiss ist.	Reduce, Recover

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Die Auswahl der CE-Maßnahmen im Textilsektor orientierte sich an der EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles (EC 2022a). Diese Strategie fokussiert auf verschiedene Handlungsoptionen, die darauf abzielen, einen kohärenten Rahmen und eine Vision für die Transformation des Textilsektors hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu schaffen.

Allerdings sind die darin formulierten CE-Maßnahmen bislang noch nicht mit konkreten Schritten zur Umsetzung hinterlegt. Auch fehlen in der EU-Textilstrategie bislang noch quantifizierbare Ziele und

Indikatoren. Vor diesem Hintergrund erfolgte die Definition der in dieser Studie betrachteten CE-Maßnahmen entsprechend der Systematik der 10-R-Strategien (siehe Abschnitt 7.1). In diesem Sinne stehen zwei der hier betrachteten CE-Maßnahmen im Zusammenhang mit vermeidungsorientierten Handlungsoptionen (Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair) und zwei weitere im Zusammenhang mit eher technischen und logistischen Innovationen (Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle). Diese Klassifizierung ist jedoch nicht sehr selektiv, da es bei allen betrachteten CE-Maßnahmen Kombinationen aus allen 10-R-Strategien geben kann.

Maßnahmen mit Fokus auf Verhaltensänderung seitens der Konsument*innen bzw. gewerblichen Marktteilnehmern

1. **CE-Maßnahme mit Fokus auf Verhaltensänderung:** Ausgehend vom Suffizienzgedanken zielen diese Handlungsoptionen darauf ab, den Verbrauch neuer Textilen zu verringern. Da das Tragen von Kleidung nach wie vor als notwendig erachtet wird, bezwecken diese Maßnahmen nicht eine Einschränkung der Nutzung von Kleidung an sich. Vielmehr geht es darum, den Bestand an selten genutzter Kleidung zu reduzieren und die Nutzungsdauer vorhandener Kleidung zu erhöhen. Dies kann durch eine Weiterverwendung eigener Bekleidung (ohne Besitzerwechsel) erfolgen. Zu diesem Zweck kann allerdings eine besondere Reinigung, Reparatur oder Änderung (z.B. Färben) der Kleidung erforderlich werden, die wiederum von gewerblichen Dienstleistern erbracht werden kann. Da Suffizienz nicht ohne Berücksichtigung gesellschaftlicher Einstellungen zu Mode, Dresscode, Kleidung als soziales Statussymbol und Freizeitverhalten erreicht werden kann, erfordern diese Handlungsoptionen eine Induzierung sozialer und ökonomischer Transformationen. Daher umfassen die CE-Maßnahmen in diesem Szenario vor allem Anreize für einen Wertewandel in Bezug auf Lebensstile sowie ökonomische Steuerungsinstrumente, die ein sparsames Konsumverhalten belohnen.

   Wirkungszusammenhang: geringerer Textilkonsum bewirkt eine längere Nutzung bereits vorhandener Textilien. Dadurch muss weniger Neuware produziert werden. Stattdessen steigt die Nachfrage nach Reparaturdienstleistungen. Es ergibt sich eine Umweltentlastung in den Vorketten der Textilproduktion sowie bei der Abfallentsorgung. Die Suffizienz hat von allen CE-Maßnahmen das höchste Umweltentlastungspotenzial, da ein Rückgang des Konsums von Textilien sich auf alle Abschnitte des Lebenswegs von Textilprodukten auswirkt.

2. **CE-Maßnahme mit Fokus auf Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen:** Neue CE-Geschäftsmodelle (B2B & B2C) ermöglichen es privaten und gewerblichen Nutzenden, die vorhandenen Textilien effizienter und länger zu nutzen. Dazu gehören klassische gewerbliche Dienstleistungen wie Textilreinigung, Änderungsschneiderei, Kleidungsverleih (z.B. Festtagsbekleidung) als auch B2B Services wie Leasing (z.B. für Dienstbekleidung, Hotelwäsche) und Second-Hand Läden. Zusätzlich können sich hier neue CE-Dienstleistungen entwickeln, z.B. web-basierte Kleidungstauschbörsen bzw., Handelsplattformen für Second-Hand Bekleidung. Diese Serviceangebote ermöglichen, dass Bekleidung mehrfach und intensiver genutzt wird, anstatt zumeist ungenutzt im Wäscheschrank zu liegen. Ungenutzte oder selten genutzte Produkte werden dadurch in geringerer Menge angeschafft bzw. ganz vermieden. Auch diese Handlungsoptionen macht soziale und ökonomische Transformation erforderlich: um ein Gedeihen CE-orientierter Geschäftsmodelle und Businessinnovation zu ermöglichen müssen sich insbesondere gesellschaftliche Einstellungen zu Konsummustern und Besitzansprüchen verändern. Die Maßnahmen sind im Bereich Kommunikation (Förderung von Akzeptanz für Second-Hand Bekleidung) und Wirtschaftsförderung angesiedelt.
   Wirkungszusammenhang: Durch die Ermöglichung einer effizienteren Nutzung vorhandener Bekleidung sinkt die Nachfrage nach Neuware. Dadurch muss weniger Bekleidung produziert und

entsorgt werden. Es ergibt sich eine Umweltentlastung in den Vorketten der Textilproduktion sowie bei der Abfallentsorgung.

Maßnahmen mit Fokus auf Produktion & Technik innerhalb der textilen End of Life-Wertschöpfungskette

3. **CE-Maßnahme mit Fokus auf Förderung der Vorbereitung zur Wiederverwendung** (Lebensdauerverlängerung der Bekleidung mit Besitzwechsel)**:** Durch ökonomische und regulatorische Anreize wird die separate Erfassung von Altkleidern aus Haushalten und gewerblichen Nutzern erhöht. Um die Getrenntsammlung von Altkleidern zu verbessern, bedarf es politischer/regulatorischer Interventionen, die einen Mengenzuwachs erfasster Altkleider und zugleich eine Verbesserung der Qualität erfasster Altkleider bewirken (bzw. verringern den Qualitätsverlust infolge Durchfeuchtung und Verschmutzung). Logistische und technische Innovation (z.B. auf Basis einer erweiterten Herstellerverantwortung) bewirken verbesserte Separation wiederverwendbarer Kleidungsstücke, was zu einer Steigerung des Angebots an hochwertigen Second-Hand Textilien im Inland beiträgt (Exporte von Second-Hand Textilien ins nicht-europäische Ausland werden hier nicht als CE-Maßnahme betrachtet).

   Wirkungszusammenhang: Die Substitution von Neuware durch Second-Hand Textilien am inländischen Markt bewirkt eine Reduktion der Nachfrage nach Neuware. Dadurch muss weniger Bekleidung produziert und entsorgt werden. Es ergibt sich eine Umweltentlastung in den Vorketten der Textilproduktion sowie bei der Abfallentsorgung.

4. **CE-Maßnahme zur Förderung des Faser-zu-Faser (F2F) Textilrecyclings und der Anwendung von F2F Rezyklaten:** Durch logistische und technische Innovation lassen sich nicht wiederverwendbare Altkleider stofflich besser verwerten. Dies schließt auch eine bereits marktübliche Kaskadennutzung von Alttextilien als Putzlappen ein (Remanufacture, Repurpose), sofern diese eine Substitution von Neuware-Putzlappen bewirkt. Aus hochwertigen Gewebequalitäten sollte jedoch mittels F2F Recycling eine Rückgewinnung von Textilfasern erfolgen, welche sich für die Produktion neuer Textilien eignen. Die Maßnahme umfasst daher sowohl die Förderung technischer Innovation im Recyclingprozess als auch Anreize zum Wiedereinsatz von Rezyklatfasern (Baumwolle) in der Textilproduktion.

   Wirkungszusammenhang: Die Verwendung von F2F Rezyklaten in der Textilproduktion führt zu einer Substitution von Primärrohstoffen (Baumwolle / Erdöl). Dadurch sinkt die Nachfrage nach Primärrohstoffen und die Menge zu entsorgender Textilabfälle sinkt. Es ergibt sich eine Umweltentlastung in den Vorketten der Textilproduktion sowie bei der Abfallentsorgung.

Die oben dargestellten CE-Maßnahmen bilden eine Neuorientierung der in der Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022) dargestellten CE-Maßnahme ab. Beibehalten wurde der Fokus auf Suffizienz und Verlängerung der Lebensdauer von Bekleidung. Diese Aspekte sind Gegenstand der CE-Maßnahmen 1 und 2 und bewirken eine Reduktion des Konsums neuer Textilien. Darin enthalten sind implizit auch die Handlungsoptionen Reparaturfreundliches Design, Reparaturservice, Second Hand-Nutzung und Leasing. Hingegen wurde die in der Machbarkeitsstudie verworfene „Erhöhung der Sammelquote von Alttextilien" nunmehr in die CE-Maßnahme 3 integriert, da dies eine der Politikmaßnahmen der EU-Textilstrategie darstellt. Die CE-Maßnahme 4 zum Thema F2F-Recycling greift die Erhöhung des Anteils von rezyklierten Fasern in der Textilproduktion mit auf. Der daraus resultierende Substitutionseffekt für textile Rohmaterialien ist Gegenstand der betrachteten Wirkungszusammenhänge. Es wird angenommen, dass sich F2F-Recycling nur etwa für die Hälfte der umgesetzten Textilmengen eignet, da bestimmte Voraussetzungen, z.B. Faserlänge, Faserzusammensetzung, gegeben sein müssen. Für einige Textilien kommt diese Art von Recycling nicht in Frage (z.T. wäre zukünftig eher ein chemisches Recycling auf Basis von Hydrolyse interessant –

dies wird hier jedoch nicht adressiert[41]). Die Verwendung von rezyklierten Polyamid-Fasern wurde ebenfalls nicht weiter berücksichtigt, da es sich dabei vorrangig um Produktionsabfälle handelt.

Aufgrund des makroökonomischen methodischen Ansatzes dieser Studie können die Beiträge der einzelnen Handlungsoptionen, die im Rahmen der Szenarien zu den jeweiligen CE-Maßnahmen zusammengefasst wurden, nicht weiter aufgeschlüsselt werden. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Handlungsoptionen nur im Gesamtkontext ihres Zusammenwirkens eine nennenswerte Wirkung auf das Gesamtsystem entfalten. Insofern kann im Rahmen dieser Potenzialstudie keine Beitragsanalyse für einzelne Elemente der CE-Maßnahmen abgeleitet werden.

Tabelle 7-28: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Textilien)

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
1	Längere Nutzungsdauer bereits vorhandener Textilien.	nein	schwach	stark	stark	Konsumverhalten
2	Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen	schwach	schwach	stark	stark	Konsumverhalten
3	Vorbereitung zur Wiederverwendung	mittel	mittel	mittel	mittel	Konsumverhalten + Technologischer Fortschritt
4	Faser-zu-Faser (F2F) Textilrecyclings	mittel	stark	mittel	mittel	Technologischer Fortschritt

Quelle: Eigene Auswertung.

Begründung der Ausprägung von CE-Maßnahmen bei Textilien

Die Ausprägungen der einzelnen CE-Maßnahmen in den vier Szenarien werden im Folgenden begründet.

Die **CE-Maßnahmen 1 und 2** werden dem Verhalten-Szenario zugeordnet. Das Technologie-Szenario spielt dagegen für diese beiden Maßnahmen keine Rolle, da die Nachfrage nach neuen Textilien hier fast ausschließlich auf verhaltensbasierte Einflussfaktoren zurückgeführt werden kann. Entscheidend für die hohe Nachfrage nach neuer Bekleidung in Deutschland und den hohen Grad der Obsoleszenz (kurze Nutzungsdauer und hoher Anteil selten genutzter Bekleidung) ist das Konsumverhalten der Bevölkerung. Diese Verhaltensänderung kann durch politische Instrumente, die auf den Konsum von Gütern und Dienstleistungen abzielen, unterstützt bzw. induziert werden. Technisch bedingte Einflussfaktoren spielen hier kaum eine Rolle.

Neue technologische Entwicklungen sind für die Umsetzung der beiden Maßnahmen nicht zwingend erforderlich, können aber unterstützend wirken, wenn sie dazu beitragen, die Transaktionskosten für eine Umstellung auf ein CE-konformes Verhalten der Textilverwender zu senken. Gewerbliche Textilanwender und öffentliche Einrichtungen können ebenfalls Shared-Economy-Instrumente (z.B. Leasing) nutzen, insbesondere für Arbeitskleidung, Uniformen, Schutzkleidung, und technische Textilien. Nicht berücksichtigt werden hier mögliche technologische "game-changer"-Technologien, die zu einer völligen Änderung der Konsumgewohnheiten führen würden (aus heutiger Sicht sind diese

[41] Die Rolle des thermisch-chemischen Recyclings in den nächsten Jahrzehnten ist derzeit schwer vorherzusehen und deshalb kaum in den Modellierungen zu berücksichtigen.

im Textilbereich eher unwahrscheinlich). Auch neue textile Materialien werden hier nicht weiter betrachtet, da sich ihre Verwendung nicht als kausaler Einflussfaktor für eine Erhöhung der Suffizienz erweist.

Im Baseline-Szenario spielt Suffizienz (Maßnahme 1) kaum eine messbare Rolle, was sich in einem kontinuierlichen Wachstumstrend des Textilmarktes in den letzten 10 Jahren manifestiert. Maßnahme 2 (Veränderung konsumseitiger Nutzungsformen) ist im Baseline-Szenario schwach ausgeprägt, weil die darunter subsumierten Dienstleistungsangebote im Vergleich zum primären Textilmarkt bislang eher eine untergeordnete Rolle spielen.

CE-Maßnahme 3 zur Vorbereitung der Wiederverwendung von Textilien basiert auf Änderungen im Verbraucherverhalten sowie auf technologischen und logistischen Innovationen. Dies funktioniert in Deutschland bereits zu einem mittleren Grad (Baseline-Szenario). Allerdings muss vor allem die Qualität der gesammelten Textilien verbessert werden. Daher sind in den Szenarien Verhalten und Technologie noch Anstrengungen mit einem mittleren Ambitionsniveau erforderlich. Besondere Anstrengungen im Verhalten-Szenario betreffen die Motivation der Endverbraucher von Textilien, gebrauchte Textilien getrennt vom Hausmüll zu sammeln und in Sammelsysteme für Alttextilien einzuspeisen. Technologische und logistische Verbesserungen sind erforderlich, um einerseits die Zugänglichkeit der Sammelsysteme für Endnutzer zu verbessern und die Transaktionskosten zu reduzieren. Auch die nachfolgenden Prozesse zur Separierung wieder benutzbarer Textilien lassen sich durch technische Automatisierung noch verbessern und die Kosten senken.

CE-Maßnahme 4 zum Faser-zu-Faser (F2F) Recycling von Textilien wird im Baseline-Szenario mit mittlerer Ausprägung eingeordnet. Im Status quo findet zwar bereits eine Kaskadennutzung von nicht mehr gebrauchten Altkleidern in Form von Putzlappen statt. Das F2F-Recycling von Post-Consumer-Altkleidern befindet sich jedoch noch in der Forschungs- und Entwicklungsphase. Die großtechnische Umsetzung des F2F-Recyclings wird bisher durch unzureichende wirtschaftliche Anreize behindert, und die entsprechenden Verfahren sind vor dem Hintergrund billigerer Primärrohstoffe in der Praxis noch nicht kostendeckend. Dieser Aspekt stellt eine große technische Herausforderung dar. Ergänzend dazu besteht auch eine hohe Herausforderung im Verhalten-Szenario, da die Akzeptanz für die Wiederverwendung von F2F-Rezyklaten bei der Produktion neuer Textilien gefördert werden muss.

Modellierungsdaten und Annahmen

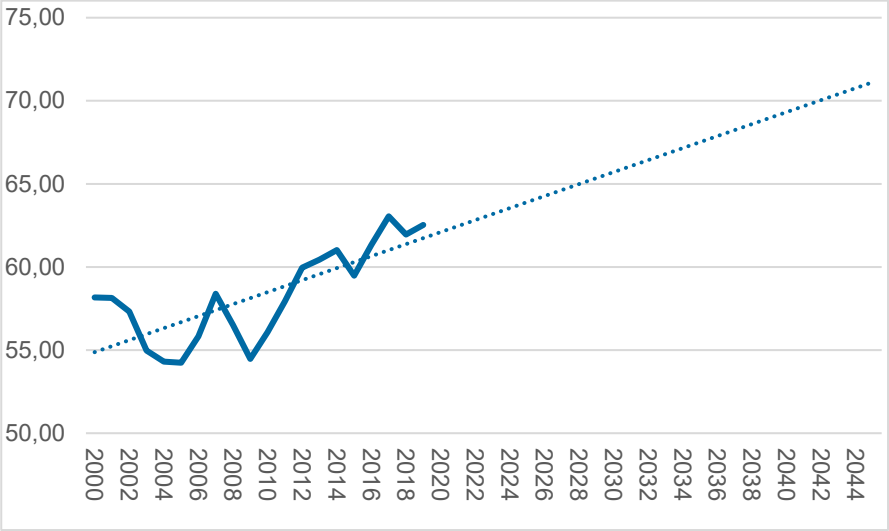
Die Modellierung des Textilsektors basiert auf dem top-down Ansatz der MRIO-Methode. Die Datengrundlage für das Status quo-Szenario wurde der EXIOBASE3 Datenbank entnommen, welche Euro-basierte Angaben zum Gesamtmarkt des Textilsektors in Deutschland enthält (EXIOBASE Consortium 2023). Die Systemgrenze dieser Datenbasis basiert auf den NACE Codes für den Textilsektor, welche jedoch keine klar nachvollziehbare Zuordnung einzelner Produktgruppen oder Produktions- und Dienstleistungsbereiche zur Systemgrenze des Textilsektors erlaubt. Es wird angenommen, dass die Systemgrenze der EXIOBASE3 Datenbank für den deutschen Textilsektor die Umsatzzahlen sowohl der inländischen Textilproduktion als auch Importe und Exporte von textilen Produkten sowie den Einzelhandel mit Textilien (inklusive der Handelsspanne) umfasst. Unklar ist jedoch, inwieweit hierbei Onlinehandel und gewerblicher Textilhandel berücksichtigt sind. Die in Form von NACE-Codes einbezogenen Textilprodukte decken sowohl Bekleidungstextilien und Haushaltstextilien sowie Bekleidungsprodukte aus Leder und Fell ab. Nicht enthalten sind hier offensichtlich Schuhe. Als komplementäre Datenquelle wurde auch die PRODCOM Statistik geprüft, die ebenfalls nach NACE-Codes für Produktgruppen strukturiert ist (Eurostat 2023c). PRODCOM Daten für den Textilsektor liegen sowohl in mengenbasierten Einheiten (Stückzahlen) als auch fiskalischen Einheiten (Euro) vor. Allerdings ist die vorhandene Datenbasis für textile Produktgruppen

stark lückenhaft. Aus diesem Grund war es im Rahmen dieser Studie nicht möglich, eine komplementäre Bottom-up-Berechnung der Auswirkungen von CE-Maßnahmen auf Basis von Mengenangaben vorzunehmen. Darüber hinaus wurde noch weitere Literatur ausgewertet, um einerseits Datenquellen für die Modellierung des Textilsektors zu erschließen und andererseits Daten zur Extrapolation der Auswirkungen von CE-Maßnahmen zu ermitteln. Es zeigte sich jedoch, dass die in der Literatur verfügbaren Kenngrößen zu ökonomischen und massestrombezogenen Aspekten insgesamt keine geeignete Datengrundlage für den Zweck dieser Studie abgeben. Insbesondere ist meistens der geographische und sachliche Geltungsbereich vorliegender Kennzahlen unklar oder nicht zuordenbar (beispielsweise ist je nach Datenquelle keine Abgrenzung zwischen Textilen und Leder, Anwendungsbereichen (Bekleidung, Haushalttextilien) oder zwischen inländischer Textilproduktion und Einzelhandel erkennbar). Das Gleiche trifft auch für Branchenkennzahlen des Textilrecyclings und des Dienstleistungssektors (bei Letzteren sind auch Angaben zu Zweiradreparatur etc. enthalten).

Zur Abschätzung der Auswirkungen der betrachteten CE-Maßnahmen 1 und 2 im Textilsektor auf die Treibhausgasemissionen und Arbeitsplatzeffekte im Zeitraum bis 2045 wurden Annahmen zu den Veränderungspotenzialen einzelner Handlungsoptionen zusammengefasst. Die hierzu verwendeten Schlüsselindikatoren sind die Angaben des Statistischen Bundesamts zu Konsumausgaben für Bekleidung in Deutschland im Bezugsjahr 2020 (Statista 2022a) sowie der Umsatz Textil Einzelhandel im Bezugsjahr 2020 (jeweils vor der Corona-bedingten Sondersituation des Einzelhandels) (Statista 2022b). Ergänzend wurde außerdem noch Inlandsverfügbarkeit aller Textilien in Deutschland im Bezugsjahr 2018 berücksichtigt (BVSE 2020). Für diesen Indikator sind Mengenangaben (Stückzahlen, Tonnage) verfügbar.

Der Status quo des Textilsektors wurde auf Basis der Konsumausgaben für Bekleidung in Deutschland im Jahr 2020 ermittelt (Statista 2022b). Zur Extrapolation des Baseline-Szenario im Jahr 2045 wurde eine lineare Trendextrapolation der Verbraucherausgaben für Bekleidung auf der Grundlage der Entwicklungen zwischen 2000 und 2020 durchgeführt (siehe Abbildung). Im Business-as-usual-Szenario zeigt sich ein klarer Wachstumstrend für Konsumausgaben von 55 Mrd. € im Jahr 2020 auf ca. 72 Mrd. € im Jahr 2045. Dieser Wachstumstrend wird in der Literatur u.a. auf den zunehmenden Anteil von Fast Fashion im Bekleidungsbereich zurückgeführt.

Abbildung 7-3: Trendextrapolation der Konsumausgaben für Bekleidung in Deutschland bis 2045



Quelle: eigene Abbildung auf Basis von (Statista 2022b)

Für die technologieorientierten CE-Maßnahmen 3 und 4 wurde das Sammelaufkommen von Altkleidern sowie die Wiederverwendungsquote (Second Hand und Downcycling) in 2018 zugrunde gelegt (BVSE 2020). Aus derselben Datengrundlage wurde der Anteil der thermischen Verwertung des nicht verwertbaren Rests von gesammelten Alttextilen berechnet.

Die Materialzusammensetzung von Bekleidungstextilien wird grundsätzlich in zwei Arten von Textilmaterialien unterschieden: sogenannte Naturfasern aus Agrarproduktion (z.B. Baumwolle, Leinen) und Chemiefasern (z.B. Polyester, Polyamid (Nylon)). Letztere werden aus Erdöl hergestellt. Bekleidungstextilien können noch eine Vielzahl anderer Materialien in variablen Zusammensetzungen enthalten. Häufig bestehen Textilien aus Mischungen verschiedener Faserarten. Mengenmäßig spielen am Weltmarkt vor allem Polyester (54 %) und Baumwolle (22 %) eine Rolle (Statista 2023).

Tabelle 7-29: Vereinfachte Materialzusammensetzung von Bekleidungstextilien

Material	Anteil in % (Annahme)	Beispiele
Chemiefasern	65	Polyester, Nylon, Elasthan
Naturfasern aus Agrarproduktion	28	Baumwolle, Leinen, Jute, Hanf, Kokos
Andere Textilmaterialien	8	Wolle, Lyocell
Metall	k.A.	Knöpfe, Reißverschlüsse
Plastik	k.A.	Knöpfe, Reißverschlüsse, Membranfolien

Quelle: Statista 2023

Modellierungsannahmen zu CE-Maßnahme 1 (Textilien):

Es wird angenommen, dass der Konsum von Neutextilien aller Art durch Anreize für Suffizienz (Änderungen in den Einstellungen zu Konsum, Modebewusstsein, Akzeptanz, soziale Wertschätzung von Mode (privat & beruflich)) gegenüber dem Status quo um kumulativ 10 % zurück geht. Dieses Reduktionsziel erscheint sehr ambitioniert, da dies zunächst eine Trendumkehr des Wachstumspfads im Textilkonsum innerhalb eines Zeitraums von etwa 10 Jahren erfordert. Anschließend wird davon ausgegangen, dass der Verbrauch neuer Textilien bis 2045 um 10 % im Vergleich zu 2020 zurückgeht, d. h. es ist eine Reduzierung um mehr als 10 % vom zukünftigen Spitzenwert des Textilverbrauchs auf das Verbrauchsniveau des verhaltensbasierten Szenarios erforderlich.

In Bezug auf Bekleidung ist davon auszugehen, dass im Verhalten- Szenario pro Person und Zeitraum weiterhin der gleiche Ausstattungsgrad erforderlich sein wird wie im Status quo. Der Nachfragerückgang wird daher nicht dadurch ausgelöst, dass weniger Bekleidung getragen wird, sondern vorhandene Bekleidung länger und öfters benutzt wird. Die Verlängerung der Nutzungsdauer einmal gekaufter Textilien erfordert zunächst die Produktion höherwertigerer Textilien mit längerer Haltbarkeit (als Fast Fashion Produkte). Maßnahmen wie Ökodesign helfen, die Haltbarkeits- und Gebrauchstauglichkeitskriterien der Konsument*innen zu erfüllen, so dass diese länger genutzt werden können. Zugleich ist auch eine Verbesserung der Reparaturfähigkeit erforderlich (Farb- & Formbeständigkeit, Scheuerfestigkeit, Nahtfestigkeit, Langlebigkeit bzw. Haltbarkeit von Reißverschlüssen und Klettverschlüssen). Allerdings kann sich infolge dieser Aktivitäten ein höherer Ressourcenaufwand (Faserstärke, Gewebedichte) ergeben, welcher sich nur dann amortisiert, wenn tatsächlich eine Steigerung der Suffizienz erfolgt. Die jeweiligen Beiträge der einzelnen Handlungsoptionen werden im Rahmen dieser Studie nicht weiter aufgeschlüsselt, da hierzu die empirische Datengrundlage zu lückenhaft ist.

Modellierungsannahmen zu CE-Maßnahme 2 (Textilien):

Die gemeinschaftliche Nutzung von Textilprodukten kann dazu beitragen, die Nutzungsfrequenz solcher Produkte zu intensivieren und Neubeschaffung für seltene/einmalige Nutzung mit anschließender oder verzögerter Obsoleszenz zu reduzieren. Es wird angenommen, dass Leasing-geber aus Kostengründen die Nutzungsphase von Produkten optimieren, d.h. besser pflegen, länger / häufiger nutzen, reparieren oder in Kaskade nutzen sowie fachgerechtem Recycling zuführen.
Entstehung zusätzlicher Gewerbebetriebe (z.B. Reparatur- und Änderungsschneiderei, Wäscherei) und neuer bzw. zusätzlicher Businessmodelle (Textil-Leasing / Product-as-a-Service) bewirkt die Entstehung neuer Arbeitsplätze. Hingegen ist im primären Textileinzelhandel mit einem Rückgang der Arbeitsplätze (v.a. Retail) zu rechnen.

Da eine Bezifferung und Extrapolation der Beiträge einzelner Teilaspekte dieser CE-Maßnahme aufgrund der lückenhaften empirischen Datengrundlage nicht möglich sind, wird eine kumulativer Beitrag zur Reduktion des Textilkonsums von 10 % angenommen. Wie bei Maßnahme 1 ist hier zunächst eine Trendumkehr im Textilkonsum nötig, bevor dann bis 2045 eine Reduktion um 10 % im Vergleich zum Status quo erfolgen kann.

Modellierungsannahmen zu CE-Maßnahme 3 (Textilien):

Die Maßnahmen zur mengenmäßigen und qualitativen Verbesserung der Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von gebrauchten Alttextilien werden in ihrer Wirkung kumulativ betrachtet. Da sie am Ende der Gebrauchsphase von Textilien ansetzen und vor allem technischer und logistischer Natur sind, wirken sie sich nicht auf eine Verringerung des Konsums neuer Textilen aus. Vielmehr ermöglichen sie die Wiederverwendung gebrauchter Bekleidung mit Besitzerwechsel. Allerdings werden die meisten dieser gebrauchten Second-Hand Textilien ins Ausland exportiert, so dass hierdurch keine nennenswerte Substitution des inländischen Konsums von Neuware zu erwarten sein wird. Allerdings kann die Untermaßnahme „Resale/Remanufacture neuer/unverkaufter Bekleidung mit Besitzerwechsel (nichtverkaufte Kollektionen, Rückläufer aus Reklamationen / Online-Handel)“ im Sinne einer Verminderung der Nachfrage im Großhandel interpretiert werden. Dies wirkt sich dämpfend auf den Business-as-usual-Trend der Nachfragesteigerung aus.

Die Modellierung geht von einer Erfassungsquote für haushaltnahe Alttextilien von 74 % im Jahr 2018 (Status quo) aus (entspricht 1.27 Mt / a) (BVSE 2020). Davon werden wiederum 62 % zur Wiederverwendung (Reuse) und 14 % für Kaskadennutzung (Repurposing) verwendet. In Summe ist dies eine Wiederverwendungsquote von 76 %. Die Modellierung des Technologie-Szenarios geht von einer Steigerungsfähigkeit der Erfassungsquote auf 84 % aus. Dies bewirkt eine Reduktion der im Hausmüll entsorgten Alttextilien. Die Annahme zur Wiederverwendungsquote geht ebenfalls von einer Steigerungsfähigkeit um 10 % auf 86 % aus. Dieses Potenzial erschließt sich v.a. auf Basis der Verringerung verbleibender Mengen bisher nicht wiederverwendbarer Alttextilien, die bisher thermisch verwertet werden. Dies hat ebenfalls eine Reduktion der zu entsorgenden Alttextilien zur Folge. Nicht berücksichtigt sind allfällige Verschiebungen zwischen Reuse und Repurpose.

Modellierungsannahmen zu CE-Maßnahme 4 (Textilien):

Maßnahmen zur Stärkung des Faser-zu-Faser Recyclings sollen nicht in Konkurrenz, sondern nachgelagert zur Vorbereitung zur Wiederverwendung umgesetzt werden. Dies hat einen zweifachen Effekt auf die Modellierung:

1. Das F2F Recycling betrifft nur den nicht wiederverwendbaren Restabfall an Alttextilien, welche bisher thermisch verwertet werden. Dies bewirkt eine Reduktion der Kosten und Emissionen durch die Müllverbrennung.

2. Durch Verbesserung der Rezyklatqualitäten soll die Rückführung der Sekundärrohstoffe auch in die Textilherstellung (Closed Loop) oder gleichwertigen ("quasi" Closed Loop) Anwendungen in zu den Ausgangsprodukten ähnlichen Produkten ermöglicht werden. Dies kann eine Substitution von Primärrohstoffen bewirken. Allerdings kommt für das F2F Recycling nicht alle Fasertypen in Frage, da z.B. Naturfasern wie Wolle oder Leinen in zu geringen Mengen und hohen Vermischungsgraden anfallen. Deren F2F Recycling ist bis 2045 nicht absehbar. Es wird für das Jahr 2045 eine Variation des F2F-Recycling-Anteils zwischen 12 % im Status quo-Szenario und 18 % im Technologie-Szenario angenommen. Dies entspricht etwa der Hälfte der im Jahr 2018 thermisch beseitigten (energetisch verwerteten) Textilabfälle.

Modellierungsannahmen zu Mix-Szenario

Die Effekte der oben genannten CE-Maßnahmen werden zunächst unabhängig voneinander modelliert. Im Mix-Szenario erfolgt eine Modellierung der Kombination aller Maßnahmen. Allerdings können sich einzelne Maßnahmen gegenseitig beeinflussen, denkbar sind sowohl synergistische als auch antagonistische Wechselwirkungen. Vor diesem Hintergrund wird vereinfachend angenommen, dass sich die Wirkungen der verhaltensbasierten Szenarien 1 und 2 gegenseitig ergänzen und nicht gegenläufig wirken. In Kombination verdoppeln sie das Einsparpotenzial auf 20 % der Nachfrage nach neuen Textilien im Vergleich zum Status quo. Da infolgedessen auch 20 % weniger gebrauchte Textilien in die Altkleidersammlung gelangen, sinkt hier der Input dementsprechend auch um 20 %. Die Effekte der Maßnahmen 3 und 4 wirken sich nicht auf die Nachfrage aus. In Kombination verringern sie die Entstehung thermisch zu entsorgender Textilabfälle um 8 %.

7.2.6 Möbel

CE-Maßnahmen und deren Ausprägung in den Szenarien

Tabelle 7-30: CE-Maßnahmen Möbel

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1	Eine höhere Wiederverwendung und mehr Wiederaufbereitung von Möbeln	Diese Maßnahme ist ein Beitrag zur Lebensdauerverlängerung: Sie bezieht sich darauf, den Wiedergebrauch zu ermöglichen.	Reduce, Reuse, Refurbish
2	Ökodesign für langlebige Möbel	Neue Möbel werden so hergestellt, dass es ihre Nutzungsdauer verlängert und/oder stoffliche Verwertung begünstigt wird.	Rethink, Reduce
3	Mehr Verwendung von recyceltem Material	Ganze Möbel oder Teile von Möbeln werden mit recycelten Materialien produziert.	Reduce, Recycle

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Die zwei Komponenten der CE-Maßnahme 1 sind die **Stärkung der Second-Hand-Nutzung** sowie **die Wiederaufbereitung der Produkte**, sodass ein zweites Leben ermöglicht wird. Zum Beispiel kann man die Höhe und Größe eines Schreibtischs anpassen oder Stühle, Sessel und Sofas neu polstern, um die "modische" Lebensdauer zu verlängern oder sie passfähig für neue Zimmern/Wohnungen zu machen. Die CE-Maßnahme 1 aus Tabelle 7-30 ist eine Zusammenfassung der Maßnahmen 1 (Eine höhere Wiederverwendung von Möbeln) & 2 (Mehr Wiederaufbereitung von Möbeln) aus der Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022). Beide zielen darauf ab, dass sich die Lebensdauer der Möbel verlängert. Die beiden Fälle, in denen ein Möbelstück mit oder ohne Wiederaufbereitung wiederverwendet wird, konnten in der Modellierung nicht unterschieden werden. CE-Maßnahme 1

aus Tabelle 7-30 setzt primär auf eine Modulation der Second-Hand-Quote in den verschiedenen Szenarien.

Ökodesign von Möbeln, d.h. CE-Maßnahme 2, zielt darauf ab, dass Möbel langlebig, leicht um-gestaltbar und/oder zeitlos und ggf. recyclingfähig sind. Dazu gehören demontagefreundliches/reparaturfreundliches Produktdesign, d.h., Komponenten sollen dekonstruierbar sein, Designstile um die „modische“ Lebensdauer zu verlängern, z.B. in Bezug auf Farben, Schadstofffreiheit, z.B. ohne Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffe (in Verbundstoffen) oder hohe Qualität, z.B. zertifiziertes Einsatzmaterialien (z.B. Holz[42], Textilien[43]). Die genauen Kriterien spielen in den Annahmen zu dieser Maßnahme keine Rolle. Die CE-Maßnahme 2 „**Ökodesign**“ aus Tabelle 7-30 ist eine Weiterentwicklung und Verbindung der Maßnahmen 3 bis 6 aus der Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022). Dies geschah aus drei Überlegungen heraus:

- Die Formulierung der ehemaligen Maßnahme 3 (Mehr Recycling der Materialien durch weniger Verwendung von Verbundstoffen) zielt auf "recyclingfähige Möbel", also eine Design-Fragestellung, ab. Ganzheitlich gedacht, ist beim Design nicht nur die Recyclingfähigkeit interessant, sondern auch Schadstofffreiheit, Dauerhaftigkeit der Möbel usw. Dies wurde in der Zusammenfassung berücksichtigt.
- Es stellte sich in der Datenrecherche heraus, dass für die drei Vorschlägen zur Materialsubstitution[44] erforderlichen Daten in ihrer Kleinteiligkeit nicht verfügbar sind (z.B. Materialzusammensetzung alternativer Klebstoffe für Verbundholz) bzw. für den gesamtdeutschen Marktüberblick fehlen (z.B. Anteil PE Fensterbeschläge im Markt heute und in Zukunft). Zudem wurde hinterfragt, ob manche der vorgeschlagenen Materialsubstitutionen die wünschenswerten sind (z.B. Materialsubstitution bei Gartenmöbeln: Aluminium durch Kiefer).
- „Mehr Recycling“ (ehemals Maßnahme 3) bezieht sich auf stoffliches Recycling. Stoffliches Recycling von Holz ist aktuell nicht Praxis (mehr als zwei Drittel thermische Verwertung, maximal stoffliche Verwertung zur Verwendung in Spanplatten, Flamme et al. 2020). Möbel können nur dann stofflich recycelt werden, wenn sich die Materialzusammensetzung von Möbel gegenüber heute verändern würde. Stoffliches Recycling wird heute erschwert durch Verbundstoffe, Kleber statt Schrauben, fehlende Zerlegbarkeit, Flammschutzmittel usw. D.h. die verstärkte stoffliche Verwertung wäre nur mit Änderungen am Design – Ökodesign – zu erreichen.

Durch mehr **Verwendung von recyceltem Material** (CE-Maßnahme 3) verringert sich der Einsatz Primärmaterial und der Bedarf an Rezyklat sowie die Recyclingbrache wachsen. Es bedeutet allerdings nicht unbedingt, dass das recycelte Material aus Altmöbeln stammt. Eine Reduktion der thermischen Verwertung von Altmöbeln ist nicht Teil der Maßnahme. Die CE-Maßnahme 3 aus Tabelle 7-30 entspricht der Maßnahme 7 aus der Machbarkeitsstudie (Prakash et al. 2022).

In der finalen Maßnahmenliste findet sich für den Sektor keine zirkuläre Verbesserungsmaßnahme für das Lebensende von Möbeln. Mit Blick auf die Abfallhierarchie wären die Steigerung von stofflichem Recycling und die Verbesserung der Sammlung und Sortierung denkbare sinnvolle Maßnahmen gewesen. Der Grund dafür, die Steigerung von stofflichem Recycling bei Ökodesign anzusiedeln, wurde oben erläutert. Zudem wurde geschlussfolgert, dass die Verbesserung der Sammlung

[42] Ein Beispiel für ein Zertifikat ist das FSC-Siegel, WWF Deutschland (2020); GIZ (2023).
[43] Beispiele für Zertifikate sind der Global Organic Textile Standard (GOTS) oder Fairwear, GIZ (2023).
[44] Substitution von Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff durch Alternativen (ehemals Maßnahme 4), Substitution von PE-Fensterbeschlägen durch Metallgestelle und -Schubkästen (ehemals Maßnahme 5) und Materialsubstitution bei Gartenmöbeln (Aluminium durch Kiefer; ehemals Maßnahme 6)

und Sortierung durch politische Instrumente zu erreichen ist, die schon existieren (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG). Die final bewerteten Maßnahmen entsprechen dem mit dem Auftraggeber vereinbarten Fokus auf die oberen Stufen der Abfallhierarchie.

Tabelle 7-31: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Möbel)

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
1	Eine höhere Wiederverwendung und mehr Wiederaufbereitung von Möbeln	Schwach	Mittel	Stark	Stark	Politik Konsum, Konsumverhalten
2	Ökodesign für Langlebige Möbel	Schwach	Mittel	Stark	Stark	Politik Produktion, Konsumverhalten
3	Mehr Verwendung von recyceltem Material	Schwach	Stark	Schwach	Stark	Technologischer Fortschritt, Politik Produktion

Quelle: Eigene Auswertung.

Begründung der Ausprägung

Im Folgenden werden die Ausprägungen der einzelnen Maßnahmen in den vier Szenarien begründet.

Die CE-Maßnahme 1 „**Höhere Wiederverwendung und mehr Wiederaufbereitung von Möbeln** “ wird mit stärkerer Ausprägung bzw. mit stärkerem Ambitionsniveau dem Verhalten-Szenario zugeordnet als dem Technologie-Szenario. Das Konsumverhalten der Bevölkerung in Deutschland ist ausschlaggebend für höhere Second-Hand-Raten und den Gang der Verbraucher*innen zu Reparaturdienstleistern wie Polsterern. Jedoch wird diese Verhaltensänderung durch Politikinstrumente, die auf den Konsum von Gütern und Dienstleistungen abzielen, unterstützt bzw. erst hervorgerufen. Diese Maßnahme erfordert keine neuen technologischen Entwicklungen und ist heute möglich, z.B. wenn hochwertige Materialien eingesetzt werden oder der Abbau und Aufbau der Möbel beim Umzug bzw. Weitergabe einfach mit gängigen Werkzeugen durchgeführt werden können. Reparaturbetriebe für die Wiederaufbereitung von Möbeln gibt es, sie erleben in den letzten Jahren eher einen Umsatzrückgang (IBIS World 2022). Die Maßnahme spielt dem derzeitigen Trend nach „Fast Furniture“ entgegen. Gemeint sind häufige Käufe von Möbeln mit weniger Wert, Gründe sind häufigere Umzüge, mehr Single-Haushalte, größere Wohnflächen, auf denen mehr Möbel stehen können, und insgesamt mehr Interesse „an Wechsel“ (Kai Hudetz, Institut für Handelsforschung in Utfeld und Kuhn 2020).

Ein erhöhter Anteil von **Möbeln im Ökodesign** wird ebenfalls durch Verhaltensänderungen mehr geprägt als durch technologische Entwicklungen. Dass sich ein Teil der Verbraucher*innen für antike bzw. alte Möbel interessiert, zeigt, dass Möbel schon vor langer Zeit langlebig, reparaturfreundlich und zeitlos hergestellt wurden und es dazu keiner neuen Technik bedarf. Im Gegensatz zur CE-Maßnahme 1 ist es jedoch die Produktionsorientierte Politik, die – zusammen mit dem Konsumverhalten – die Maßnahme treibt. Es sind verpflichtende Mindeststandards für die Hersteller, wie z.B. Demontagefreundliches Design, Langlebigkeit durch qualitativ hochwertige Materialien, Schadstofffreiheit usw., die die Qualität der Produkte im Massenmarkt erhöhen. Dadurch ändert sich das Verhalten der Verbraucher*innen, da die Wahrscheinlichkeit, minderwertige Ware zu kaufen, sinkt. Die Maßnahme ist im Technologie-Szenario deswegen mit mittlerer Ausprägung bewertet worden,

da das Angebot von ökodesignten Möbeln vermutlich von anderen Produktionsmustern, z.B. mehr Handarbeit durch Tischler und Schreiner, ausgeht als die Möbel aus „Fast Furniture“-Produktionen.

Die Maßnahme zur **Steigerung von Rezyklaten in Möbeln** erfordert besondere Anstrengungen im Produktions- und Technologiebereich. Die Maßnahme wird aus diesem Grund dem Technologie-Szenario mit starker Ausprägung zugeordnet. Es geht darum, die stofflichen Verwertungsraten von Holz sowie die Qualität des Rezyklats wesentlich zu steigern, um so sekundäres Holz für Möbel überhaupt erst einsetzbar zu machen. Dabei sind keine „Zukunftstechnologien“, aber dennoch Forschung und eine Weiterentwicklung des heutigen Stands der Technik notwendig. Heute beläuft sich die Menge an stofflich recyceltem Holz auf weniger als ein Drittel, der allergrößte Teil davon wird in Spanplatten eingesetzt (Flamme et al. 2020). Der Erfolg der Maßnahmen zur erhöhten Verwendung von recyceltem Material in den Möbeln hängt von Faktoren, wie bessere Sammelstrukturen, arbeitsintensive Demontageprozesse und Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien ab.

Modellierungsdaten und Annahmen

Im Folgenden sind die zentralen Daten und Annahmen für die Modellierung des Möbel-Sektors dargestellt. Generell ist die Informationslage im Sektor Möbel nicht sehr gut. Es gibt wenig Ökobilanzstudien, die das Potenzial von CE-Maßnahmen abschätzen und Studien beziehen sich z.T. einzelne Möbel und lassen sich schlecht für den gesamten Möbelsektor verallgemeinern.

Für alle Maßnahmen ist der Möbelkonsum in Deutschland pro Jahr die Basis. Dieser setzt sich zusammen aus Produktion, Import und Export und belief sich 2016 auf 16,8 Mrd. € pro Jahr. Damit hat Deutschland den höchsten Möbelkonsum in der EU (68 Mrd. € pro Jahr). Der EU-Konsum an Möbeln entspricht 10.500.000 Tonnen pro Jahr, in Deutschland sind es 2.590.000 Tonnen pro Jahr. (European Environment Bureau (EEB) 2017) Mit den in Tabelle 7-32 dargestellten jährlichen Wachstumsraten wurde der Möbelkonsum bis 2045 prognostiziert. Dies ist in den ersten drei Zeilen von Tabelle 7-33 wiedergegeben.

Tabelle 7-32: Jährliche Wachstumsraten Möbel und Second-Hand-Möbelmarkt

Annual Growth Rate	Prognosen laut Literatur	Diese Studie bis 2045
Global Off the shelf Second-hand Funiture Market growth 2019-2027 (second hand)	10,17 % (Verified Market Research 2021)	3,00 %
Germany's Furniture market annual growth (2022-2026)	4,61 % (Statista 2022a)	1,00 %

Quellen siehe mittlere Spalte.

Dem gegenüber steht die Menge an Altmöbeln in Deutschland pro Jahr. Diese kann man ausgehend Sperrmülldaten (3.100.000 Tonnen in 2021 laut Statistisches Bundesamt 2023), mit dem Anteil an Möbeln im Sperrmüll (61 % laut UBA 2022c) und der Information, dass circa die Hälfte alter Möbel durch den Sperrmüll gesammelt wird (Umweltbundesamt (UBA) 2022c), berechnet werden: In Deutschland fallen demnach heute ~3.780.000 Tonnen Altmöbel pro Jahr an. Die Rate, mit der der Sperrmüll über die Jahre 2017 bis 2021 stieg, wurde die Sperrmüllmenge für das Jahr 2045 und daraus die Altmöbel-Menge berechnet.

Eine höhere Wiederverwendung und mehr Wiederaufbereitung von Möbeln

WeiterGebenOrg.de (2019) geht davon aus, dass jährlich 100.000.000 Möbel (Stück) abgegeben werden. Davon werden laut ihren Angaben, 15 % via Gebrauchtmöbelhändler / Online-Flohmärkte

verkauft, 20 % an Freunde und Sozialkaufhäuser verschenkt, 50 % thermisch verwertet (Sperrmüll und 15 % eingelagert oder anders genutzt. Die Second-Hand-Rate beliefe sich demnach auf 35 %. Die Autor*innen der Studie vom EEB (2017a) variieren den Second-Hand-Anteil in verschiedenen Szenarien ihrer Studie zwischen 5 und 15 %.

Der Anteil an Altmöbeln, die Second-hand oder wieder aufbereitet weiterverkauft werden, wurde in dieser Studie auf 10 % heute und zwischen 13 und 24 % in den Szenarien für 2045 angenommen (#4, Tabelle 7-33). Mit diesem Anteil und den Daten für den Möbelkonsum und die Tonnagen für neue und alte Möbel (oben), wurde der Marktanteil für Second-Hand-Möbel und Neumöbel aufgesplittet (#5 und #6, Tabelle 7-33). Zwar gibt Carlsson Kanyama et al. (2021) an, Second-Hand-Möbel seien 42 % billiger als neue Möbel und Reparaturen 56 % teurer als Neuware. Dies ließ sich jedoch nicht mit anderen Quellen verifizieren und Preise können auch schwer prognostiziert werden. Daher wurden keine Abzüge für billigere Preise von Second-Hand-Ware gemacht. Es wurden auch keine Aufschläge für Reparaturen, die meistens teurer sind, drauf gerechnet.

Es wurde angenommen, dass in allen drei Szenarien eine konstante Menge an Möbeln (in Tonnen) verkauft wird – dies kann neue oder Second-Hand-Ware sein (#7, Tabelle 7-33). Auch die Altmöbel-Menge wird über die Szenarien nicht variiert (#3, Tabelle 7-33).

Tabelle 7-33: Marktdaten für Neu- und Second-Hand-Möbel-Konsum in Deutschland pro Jahr

#	Datensatz	Status quo	Baseline 2045	Verhalten 2045	Techno-logie 2045	Mix 2045	Einheit
1	Möbelkonsum in DE pro Jahr (neu und 2nd Hand)	16,80	25,34	24,62	25,13	24,49	Mrd. €
2	Neumöbel in DE pro Jahr	2.594.118	3.736.688	3.227.831	3.586.479	3.138.169	Tonnen
3	Altmöbel in DE pro Jahr	3.782.000	5.704.329	5.704.329	5.704.329	5.704.329	Tonnen
4	Anteil an Altmöbeln, die Second-hand oder refurbished weiter verkauft werden	10	13	22	16	24	%
5	Konsum Neumöbel	14,66	21,12	17,53	20,06	16,89	Mrd. €
6	Möbel Consumption Second-hand-Markt	2,14	4,22	7,09	5,07	7,60	Mrd. €
7	Gesamt gekauft pro Jahr	2.972.318	4.483.098	4.483.098	4.483.098	4.483.098	Tonnen
	Rechnerische Größe						
8	Anteil Second Hand an Möbelkäufen (Marktanteil Second Hand)	13	17	28	20	30	%

Hinweis: Zum Unterschied von #4 und #8 siehe Fußnote[45]
Quelle: (EEB 2017a; UBA 2022c; Statistisches Bundesamt 2023)

Aus diesen Zahlen ergibt sich die Quantifizierung einiger Parameter der CE-Maßnahme 1 für Möbel, d.h. die Änderung der Nachfrage und Produktion von neuen Möbeln, die Änderung – hier Zunahme

[45] Second-Hand-Anteile (%) lassen sich an einigen Stellen im Lebenszyklus eines Möbelstücks berechnen und auf unterschiedliche Größen beziehen: #4 ist der Anteil der vom Erstnutzer bereits entsorgten Möbelstücke, die wiederverwendet werden; #8 ist eine Häufigkeit, mit der bei der Kaufentscheidung für ein neues oder gebrauchtes Möbelstück entschieden wird.

– des Secondhand- und Repair-Sektors, der veränderte – hier verringerte – Einsatz von Primärmaterialien sowie die geänderte Abfallmengen für Verbrennung und Deponierung. Diese wurden mit einem mittleren Sperrmüll-Entsorgungspreis von 107,54 € monetarisiert (Zweckverband Müllverwertung Schwandorf 2021; AWG Wuppertal 2023; Müllabfuhr Zweckverband Odenwald (MZVO) 2018).

Der Anstieg an Transport und Bedarf an Gewerbeflächen für Rücknahme, Lagerung und Secondhand Verkauf wurden hier vernachlässigt.

Ökodesign für Langlebige Möbel

Es gibt aktuell keine allgemein gültigen Ökodesign-Kriterien für Möbel[46], es gibt auch keine unabhängigen Statistiken über ihren Marktanteil bzw. Anteil im Produktsegment. Aufgrund der fehlenden Kriterien bezeichnen Hersteller ihre Produkte als „nachhaltig“ oder „ökodesignt“ ohne ein einheitliches Verständnis, was diese Produkte auszeichnet. Baufachfrau e.V. (2011) haben vor mehr als 10 Jahren aufgeschrieben, was nachhaltige Möbel ausmachen. Im Gespräch mit den Autor*innen dieser Studie bestätigen sie, dass seit der Veröffentlichung im nachhaltigen, ökodesignten Möbelbau nicht viel passiert ist. Die Marktanteile wurden für die Berechnung dieser Maßnahme geschätzt, siehe Zeile 1 in Tabelle 7-34: 2 % Marktanteil für ökodesignte Möbel in der Baseline, 6 % im Technologie-Szenario und 10 % im Verhalten- sowie im Mix-Szenario. Es ist zu beachten, dass die CE-Maßnahmen 1 und 2 nebeneinander existieren können sollen, d.h. dass der Neumöbelkonsum sowohl durch Wiederverwendung als auch Lebensdauerverlängerung durch Ökodesign gesenkt werden kann. Mit einem 24 %igen Anteil Wiederverwendung in der CE-Maßnahme 1 und 10 % Ökodesign-Anteil schaut man auf ca. 1/3 Möbel mit langer Nutzungsdauer.

Gleichermaßen „unbekannt“ wie Marktanteile von ökodesignten Möbeln ist die durchschnittliche Lebensdauer – außer für IKEA-Ware, für die das Team von Havc-Buzz (2022) vier bis acht Jahre angibt. Daher rührt die Annahme von 6 Jahren Lebensdauer von IKEA-Ware. Es wurde mit einer Verdopplung der Lebensdauer aufgrund von Ökodesign gerechnet.

Ausgehend von 21,12 Mrd. € Neumöbelkonsum für Jahr in Deutschland wurde mit dem Anstieg der durchschnittlichen Lebensdauer je Szenario, wie in Tabelle 7-34 angegeben, die Abnahme des Möbelkonsums in Mrd. €, sowie ausgehend von 3.740.000 Tonnen pro Jahr die Abnahme an Neumöbeln in Tonnen pro Jahr berechnet. Der Verlust, der durch die Abnahme an Möbeln entsteht, wird zum Teil dadurch ausgeglichen, dass neue Möbel teurer sind: Ausgehend von der Annahme, dass hochwertige Möbel ungefähr 67 % teurer sind im Vergleich zu Standard-Möbeln[47], wurde der Verlust im Möbelkonsum teilweise mit höheren Möbelstückpreisen ausgeglichen.

Tabelle 7-34: Annahmen zur MDCE-Maßnahme „Ökodesign“ bei Möbeln

	Status quo	Baseline 2045	Technologie 2045	Verhalten 2045	Mix 2045
Anteil Produkte mit Ökodesign	0,02	0,02	0,06	0,1	0,1
Lebensdauer ohne Ökodesign[48]	6	6	6	6	6
Lebensdauer mit Ökodesign	12	12	12	12	12
Lebensdauer im Durchschnitt	6,12	6,12	6,36	6,6	6,6

[46] In der Ecodesign for Sustainable Products Regulation hat die Kommission Möbel als eine mögliche Produktgruppe vorgeschlagen, sodass sich das auf absehbare Zeit ändern könnte.

[47] Proxy sind die Preise für einen konventionellen vs. zertifizierten (Umweltzeichen) Holzschreibtisch von 150 € bzw. 250 €. Dies entspricht einem Verhältnis von 167 %.

[48] „IKEA furniture generally lasts 4-8 years. This differs according to material, use, care, and construction“ Hvac-buzz Team (2022).

	Status quo	Baseline 2045	Technologie 2045	Verhalten 2045	Mix 2045
Anstieg der durchschnittlichen Lebensdauer pro Jahr		0	0,01	0,02	0,02
Möbelkonsums in Mrd. €		21,12	19,63	18,44	18,44
Neumöbeln in Tonnen pro Jahr		3.736.688	2.935.679	2.300.485	2.300.485

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen.

Es ergeben sich Änderungen des Materialbedarfs für neue Möbel durch die Lebensdauerverlängerung von zusätzlichen 1.142.570 Tonnen pro Jahr (t/a) in der Baseline gegenüber dem Status quo sowie Reduktionen von 801.009 t/a im Technologie- sowie 1.436.202 t/a im Verhalten- und Mix-Szenario gegenüber der Baseline. Nicht berücksichtigt werden konnten Gewichtssteigerungen für ökodesignte Möbel, die in vielen Fällen aus höherwertigeren, d.h. zum Teil auch schwereren Teilen / Materialien, bestehen.

Die Veränderungen wurden – wie schon bei CE-Maßnahme 1 – mit einem mittleren Sperrmüll-Entsorgungspreis von 107,54 € monetarisiert (Zweckverband Müllverwertung Schwandorf 2021; AWG Wuppertal 2023; MZVO 2018).

Mehr Verwendung von recyceltem Material

Im Zusammenhang mit CE-Maßnahme 1 wurde ausgerechnet, dass der Möbelbedarf in Deutschland pro Jahr heute bei 2.594.118 Tonnen pro Jahr (t/a) und gemäß der Annahmen 2045 in der Baseline bei 3.736.688 t/a liegt. Diese Gesamttonnage und die Materialzusammensetzung in Tabelle 7-35 zugrunde legend wurden die differenzierten Materialbedarfe für die Baseline für das Jahr 2045 bestimmt.

Tabelle 7-35: Vereinfachte Materialzusammensetzung von Möbeln im Schnitt

Material	Anteil im Schnitt in %	Status quo (t/a) – nur Primärmaterial	Baseline 2045 (t/a) – nur Primärmaterial
Holz	49	1.281.432,19	1.845.834,58
Holzkomposit-Material	40	1.042.355,76	1.501.457,76
Metall	3	77.915,38	112.232,94
Plastik	4	104.561,32	150.614,99
Textil / Glas	3	73.409,36	105.742,26
Chemikalien	1	14.443,64	20.805,30

Hinweis: Rattan und Bambus wurden nicht betrachtet, spielen aber für manche Möbel-Arten eine Rolle.
Quelle: Durchschnitt auf Basis von (Wang et al. 2016; Iritani et al. 2015; Wenker und Rüter 2015; EEB 2017a)

In den Szenarien wurden verschiedene Rezyklateinsatzquoten angenommen (siehe erste Zeile in Tabelle 7-36). Die folgende Tabelle zeigt auch den veränderten Einsatz bzw. Bedarf an Primär- und Sekundärmaterialien. Mit einem Preis von 5.652,15 € pro Tonne Neumöbel[49] kann die Tonnage monetarisiert werden.

[49] Quotient aus 14,66 Mrd. € Möbelkonsum und 2.594.118 Tonnen Neumöbeln (gemäß EEB (2017) nach Abzug des heutigen Second-Hand-Möbelmarkts, siehe CE-Maßnahme 1)

Tabelle 7-36: Rezyklateinsatzquoten und Materialänderungen in den Szenarien

	Baseline 2045	Verhalten 2045	Technologie 2045	Mix 2045
Rezyklateinsatzquote	10 %	12 %	25 %	27 %
Veränderter Einsatz Primärmaterial (t)	-371.588,25	-445.905,90	-928.970,63	-1.003.288,28
Veränderter Einsatz Primärmaterial (Mrd. €)	-2,10	-2,52	-5,25	-5,67
Wachsender Bedarf Sekundärmaterial (t)	371.588,25	445.905,90	928.970,63	1.003.288,28

Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen.

Festlegungen und Annahmen für die Rohstoffbilanzierung

Die Berechnungen der Veränderungspotenziale wurden auf Grundlage der von den Sektorexpert*innen zur Verfügung gestellten Daten zum Neumöbelkonsum durchgeführt.

Für Maßnahme 1 (Erhöhte Wiederverwendung und Wiederaufbereitung von Möbeln) und Maßnahme 2 (Ecodesign für langlebige Möbel) wurden die Veränderungspotenziale als Produkte der prozentualen Veränderung der Neumöbelabsätze (als Massen in t) und den Sektoranteilen der jeweiligen Rohstoffe erhalten. Die Maßnahmen wurden rohstoffübergreifend betrachtet und es wurde angenommen, dass sich die Materialzusammensetzung nicht ändert (d.h., dass sich die Bedarfe der einzelnen Rohstoffe des Sektors gleichermaßen und proportional zum Absatz der Gesamtmöbelmenge verändern).

Die Maßnahme 3 (Mehrverwendung von recyceltem Material wurde nicht quantifiziert, da angenommen wird, dass die Maßnahme keinen direkten Effekt auf Bedarf oder Mehrangebot hat (vgl. Kapitel 3.5.6).

7.2.7 Beleuchtung

CE-Maßnahmen und deren Ausprägung in den Szenarien

Tabelle 7-37: CE-Maßnahmen Beleuchtung

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
1	Steigerung der Sammelquote	Erhöhung der Menge an Altlampen die durch dafür gedachte Sammelstellen gesammelt werden (nicht Hausmüll). Derart gesammelte Lampen können einfach einer Verwertung zugeführt werden. Von dieser Maßnahme werden keine Lampen betroffen die durch im Rahmen von “Beleuchtung als Dienstleistung” gehandhabt werden.	Recycle
2	Vermehrte stoffliche Verwertung von Altlampen	Komponenten von LED-Lampen, bei denen momentan noch eine stoffliche Verwertung schwierig ist (Kunststoff, Elektronik) werden durch vermehrten Aufwand recycelt oder durch andere Komponenten ersetzt (Glas).	Recycle, Remanufacture
3	Materialeinsparungen bei Lampenproduktion	Durch technische Fortschritte in der Produktion können werden weniger Materialien für die Herstellung von LED-Lampenkomponenten benötigt.	Reduce

	Maßnahme	Beschreibung	R-Strategie
4	Verzicht auf Deko-Lampen	Die Nachfrage nach Deko-Lampen (d.h. Lampen in Leuchten, die nur dekorative Zwecke erfüllen und nicht für eine ausreichende Raumbeleuchtung erforderlich sind) wird verringert.	Refuse
5	Reduktion von Leuchten ohne austauschbare Leuchtmittel	Der Anteil and Leuchten, bei denen nicht austauschbare Leuchtmittel (also Lampen) verbaut sind, wird durch verändertes Design reduziert. Dadurch können kaputte Lampen leichter gesammelt und wiederverwertet werden.	Rethink
6	Langlebiges Lampendesign	Durch verbessertes Design und Verwendung von hochwertigen Materialien wird die Lebensdauer von LED-Lampen weiter erhöht.	Rethink
7	Beleuchtung als Dienstleistung	Die Bereitstellung von Beleuchtung als Dienstleistung gewinnt an Bedeutung und der Markt dafür wächst. Dadurch werden im gewerblichen Bereich höherwertige und langlebigere Lampen verbaut und die genutzten Lampen werden zu einem höheren Anteil gesammelt und wiederverwertet.	Rethink, Recycle

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Wie in den meisten anderen Sektoren, wurden auch im Beleuchtungssektor die Maßnahmen gegenüber der Machbarkeitsstudie überarbeitet, nachgeschärft und konsolidiert. Die ursprünglichen Maßnahmen „Steigerung der Sammlung von Altlampen“ und „Reduktion der Entsorgung über Hausmüll“ wurden in der Maßnahme „Steigerung der Sammelquote“ zusammengefasst. Grund dafür war, dass eine Reduktion der Entsorgung über Hausmüll ja immer mit einer gesteigerten Sammlung von Altlampen einhergeht. Daher beschreiben beide Maßnahmen dasselbe Phänomen. Zweitens wurden die Maßnahmen stoffliche Verwertung von Altlampen und „Verwertung von Platinen“ ebenfalls aus den gleichen Gründen in der neuen CE-Maßnahme „vermehrte stoffliche Verwertung von Altlampen“ zusammengefasst. Die Maßnahme „Verwertung des Leuchtstoffpulvers“ wurde gestrichen, da dieses bereits in Verwertungsanlagen entfrachtet wird und Gasentladungslampen in den Szenarien auch nur eine geringe Rolle spielen. Schlussendlich wurde auch die Maßnahme „Schadstoffentfrachtung“ aus den gleichen Gründen gestrichen. Die Maßnahme „Energieeinsparung durch effizientere Lampensysteme” wurde ergänzt, um auch die Änderungen im laufenden Betrieb abzubilden.

Tabelle 7-38: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Beleuchtung)

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsseltreiber
1	Steigerung der Sammelquote	Schwach (Erhöhung auf 65 %)	Schwach (Erhöhung auf 65 %)	Stark (Erhöhung auf 75 %)	Stark (Erhöhung auf 75 %)	Konsumverhalten
2	Vermehrte stoffliche Verwertung von Altlampen	Keine Änderungen	Mittel (LED-Elektronik)	Mittel (Glas statt Kunststoff)	Stark (beides)	Technologischer Fortschritt; Konsumverhalten
3	Materialeinsparungen bei Lampenproduktion	Schwach (10 % bei LED)	Stark (25 % LED; 5 % GEL)	Schwach (10 % bei LED)	Stark (25 % LED; 5 % GEL)	Technologischer Fortschritt
4	Verzicht auf Deko-Lampen	Anteil steigt um 10 %	Anteil steigt um 10 %	Stark (Anteil sinkt um 50 %	Stark (Anteil sinkt um 50 %	Konsumverhalten

	Maßnahme	Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Schlüsse-treiber
5	Reduktion von Leuchten ohne austauschbare Leuchtmittel	Keine Änderungen (Anteil 29 %)	Steigerung um 20 %	Stark (Anteil sinkt um 60 %)	Stark (Anteil sinkt um 60 %)	Konsumverhalten
6	Langlebiges Lampendesign	Keine Änderungen (LED 25000h)	Mittel (LED 40000h)	Mittel/Stark (LED 45000h)	Stark (LED 50000h	Technologischer Fortschritt; Konsumverhalten
7	Beleuchtung als Dienstleistung	Schwach (10 % des Marktpot.)	Schwach (10 % des Marktpot.)	Stark (60 % des Marktpot.)	Stark (70 % des Marktpot.)	Konsumverhalten; Technologischer Fortschritt

Quelle: Eigene Erstellung

Begründung der Ausprägung

Im Folgenden werden die Ausprägungen der einzelnen Maßnahmen in den vier Szenarien begründet.

Erhöhung der Sammelquote: Im Elektrogesetz wird als Ziel eine Sammelquote für alle Elektroaltgeräte (inklusive Lampen) von 65 % vorgeschrieben (Deutsche Bundesregierung 2022). In den letzten stagniert die Sammelquote bei ca. 45 % (UBA 2022a). Bei Lampen beträgt die aktuelle Sammelquote bei ca. 53 % (EAR - Stiftung Elektro-Altgeräte Register 2020) und liegt somit über jener anderer Elektroaltgeräte. In Abstimmung mit dem Sektor IKT/Haushaltsgeräte wird deshalb für das Baseline-Szenario ein Erreichen des Ziels von 65 % angenommen. Im Vergleich zu IKT ist es deshalb ev. sogar wahrscheinlicher, dass das Ziel erreicht wird. Die technischen Möglichkeiten einer Sammlung von Altlampen sind gegeben und es existiert ein dichtes Netz an Rücknahmestellen. Eine Erhöhung der Sammelquote wird somit durch eine Änderung des Verhaltens von Konsument*innen bestimmt. Deshalb wird im Verhalten-Szenario von einer weiteren Erhöhung der Quote auf 75 % ausgegangen. Im Technologie-Szenario kommt es hingegen zu keiner Veränderung gegenüber dem Baseline-Szenario. Im Mix-Szenario werden sich nicht ausschließende technische und verhaltensbezogene Anstrengungen kombiniert. Deshalb wird hier auch von einer Steigerung auf 75 % ausgegangen.

Vermehrte stoffliche Verwertung von Altleuchten: Der Anteil der Mengen an gesammelten Altlampen (in kg), die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können liegt aktuell bei knapp über 90 % (Destatis 2018 in UBA 2020c). Dieser sehr hohe Wert, ist auf den hohen Anteil an Gasentladungslampen im Sammelgut zurückzuführen, deren vergleichsweisen einfach zusammengesetzten Komponenten (v.a. Glas) sich Großteils einfach recyceln lassen (Lightcycle GmbH 23.11.2022). Mit dem, in Zukunft zu erwartenden, höheren Anteil an LED-Lampen in der Sammelmenge, kommt es hier zu neuen Herausforderungen, da bei LED-Lampen vermehrt Kunststoffe und Elektrokomponenten verbaut sind, die sich aktuell weniger ressourceneffizient recyceln lassen. Deswegen wird im Baseline-Szenario von einer verringerten Recyclingquote ausgegangen. Im Technologie-Szenario wird angenommen, dass durch technischen Fortschritt ein Großteil (80 %) der Elektronkomponenten von LED-Lampen vollwertig stofflich verwerten lassen. Im Verhalten-Szenario wird hingegen auf bewährte und recyclingfreudige Technik zurückgegriffen und Glas ersetzt jene 60 % des ursprünglich eingesetzten Kunststoffes. Im Mix-Szenario werden beide Anstrengungen kombiniert.

Materialeinsparung bei der Lampenproduktion: In den letzten Jahrzehnten wurden teils beachtliche Materialeinsparungen bei der Lampenproduktion erzielt (siehe z.B. Ritzenhoff 2019). Ziel der

Einsparungen waren Effizienzsteigerungen in der Produktion. Dementsprechend werden im Technologie-Szenario, in welchem die technische Erhöhung der Produktionseffizienzen eine zentrale Rolle spielt, hohe Materialeinsparungen angenommen. Genauer gesagt wird hier davon ausgegangen, dass Fortschritte in der Materialeffizient ähnliche Ausmaße annehmen, wie sie bereits in vergangenen Jahren erzielt wurden. Im Baseline-, und Verhalten-Szenario kommt es aufgrund anderer Schwerpunkte nur zu moderaten Einsparungen. Da das Mix-Szenario eine Kombination aus technischen und verhaltensbezogenen Anstrengungen darstellt, werden auch hier hohe Materialeinsparungen angenommen.

Verzicht auf Deko-Lampen: Als Deko-Lampen werden alle Lampen bezeichnet die hauptsächlich einen dekorativen Zweck erfüllen und nicht zur ausreichenden Ausleuchtung von Räumen oder Freiflächen dienen. Beim Verzicht auf Deko-Lampen handelt es sich also um eine reine Suffizienz-Maßnahme. Im Baseline-, und im Technologie-Szenario kommt es deshalb zu keiner Reduktion des Absatzes von Deko-Lampen. Im Verhalten-, und Mix-Szenario kommt es hingegen zu einer starken Reduktion des Absatzes von Deko-Lampen um 50 %.

Reduktion von Leuchten ohne austauschbare Leuchtmittel: In einem beachtlichen Anteil von Leuchten werden Leuchtmittel verbaut die nicht austauschbar sind. Derartige Leuchten zeichnen sich u.a. oft durch reduzierte Herstellungskosten und geringere Reparaturfähigkeit aus (Dünnhoff und Palm 2017). Sie sind deshalb eher mit einem auf Massenkonsum und Wachstum ausgerichtetes Produktionssystem verbunden. Im Baseline-Szenario wird deshalb von keiner Reduktion ausgegangen. Im Technologie-Szenario kommt es aufgrund der Wachstums-, und Effizienzorientierung sogar zu einer leichten Steigerung des Anteils an Leuchten mit fest verbauten Leuchtmitteln. Eine derartige Entwicklung ist nicht kompatibel mit den Annahmen des Verhalten-Szenarios (Fokus auf Reparaturfähigkeit und andere, den Konsum verringernde Maßnahmen). Hier kommt es deshalb zu einer starken Verringerung von Leuchten mit fest verbauten Leuchtmitteln (siehe Tabelle x). Im Mix-Szenario, in dem technische Fortschritte, mit auf Suffizienz ausgerichteten Maßnahmen kombiniert werden, kommt es ebenfalls zu einer starken Reduktion.

Langlebiges Lampendesign: Verschiedene Studien (NAOS - National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2017; Kemna et al. 2015a; 2015b) gehen davon aus, dass die Lebensdauer von LED-Lampen sich in Zukunft noch erhöht werden kann. Das theoretisch technische Potenzial ist hierfür sehr hoch (über 100.000 Stunden) und je mehr es ausgeschöpft wird, desto mehr wird sich die Lebensdauer erhöhen. Allerdings wird davon ausgegangen, dass aus rein markttechnischen Gründen es für Unternehmen keinen Sinn macht Lampen mit einer Lebensdauer von mehr als 40.000 Stunden zu produzieren

Aufgrund dieser Annahmen kommt es im Technologie-Szenario zwar bereits allein aufgrund des technischen Fortschritts zu weiteren Verbesserungen, dieser wird jedoch aufgrund von Marketingüberlegungen (Reduktion des Absatzes durch verlängerte Lebensdauer) gedrosselt. Im Verhalten-Szenario zwingen neue Regulierungen dazu, die Lebensdauer noch stärker zu erhöhen. Im Mix-Szenario wird schlussendlich die höchste Lebensdauer erreicht, da hier technischer Fortschritt „freiwillig“ genutzt wird, um die Lebensdauer zu verlängern. Im Baseline-Szenario wird keine Erhöhung der Lebensdauer angenommen.

Beleuchtung als Dienstleistung: Wenn sich eine Kreislaufwirtschaft in Deutschland etabliert, dann wird „Beleuchtung als Dienstleistung“ ein zentrales Geschäftsmodell für die Beleuchtungsindustrie werden (ZVEI e.V. 2021). Der Grund hierfür ist, dass in einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft weniger Lampen aufgrund der höheren Lebensdauer und des Verzichts auf unnötige Beleuchtung verkauft werden. Im Mix-Szenario, in dem sich aufgrund der anderen Maßnahmen eine hoch ambitionierte Kreislaufwirtschaft etabliert hat, wird deshalb auch von einer starken Ausprägung dieser

Maßnahme ausgegangen. Im Verhalten-Szenario ist diese Maßnahme ebenfalls stark ausgeprägt, da sie gut mit dem Suffizienzgedanken zusammenpasst. Im Gegensatz dazu kann sich „Beleuchtung als Dienstleistung“ im Baseline-, und im Technologie-Szenario nur schwer etablieren, da sich im ersten Szenario Kreislaufwirtschaft im Allgemeinen nur wenig etabliert und sie im zweiten Szenario in Konflikt mit dem Wachstumsgedanken steht.

Modellierungsdaten und Annahmen

Genereller Ansatz der Modellierung der Maßnahmen

Die Modellierung erfolgte bottom-up auf Basis der jährlich in Verkehr gebrachten und recycelten Mengen and Gasentladungslampen (GEL) und LED-Lampen (LED). Hierbei handelt es sich nur um Lampen (d.h. um die eigentlichen Leuchtkörper) und nicht um die gesamten Leuchten (z.B. Kronleuchter, Tischlampen etc.). Anhand dieser Lampenmengen wurden die dazugehörige Materialfraktionen berechnet und ökonomische Impulse berechnet, aus denen dann in weiteren Modellierungsschritten die Wirkungskategorien berechnet wurden.

Die Modellierung der Maßnahmen folgte folgenden Grundmuster: Jede Maßnahme hat einen Einfluss auf die Materialkreisläufe im Beleuchtungssektor. Erstens können Maßnahmen den Bedarf an Primärmaterialien durch eine geringere Nachfrage an Lampen oder durch Materialeinsparungen in der Produktion reduzieren. Zweitens ändern sich durch Maßnahmen die Materialmengen, die einer stofflichen oder thermischen Verwertung zugeführt werden können. Alle Maßnahmen beeinflussen beide Formen von Stoffströmen. Die Änderungen in den Stoffströmen geht auch mit ökonomischen Veränderungen einher, da weniger Lampen verkauft werden und sich auch die Umsätze der Abfall-, und Recyclingindustrie ändern. . Im Folgenden wird kurz zusammengefasst, wie die einzelnen Maßnahmen auf die Stoffströme wirken:

- **Erhöhung der Sammelquote:** Durch die Steigerung der Sammelquote von Altlampen werden mehr Lampen gesammelt und dadurch auch mehr Sekundärmaterialien über eine stoffliche Verwertung verfügbar gemacht. Dadurch kommt es zu wirtschaftlichen Impulsen für die Recyclingwirtschaft. Gleichzeitig verringert sich dadurch der Bedarf an Primärmaterialien. Durch die vermehrte Sammlung erhöht sich auch die Abfallmenge die thermisch verwertet wird. Dafür reduzieren sich die Abfallmengen auf Deponien.
- **Vermehrte stoffliche Verwertung von Altleuchten**: Durch die Maßnahmen können in verschiedenen Szenarien gesammelte Lampenkomponenten, die bis dato nicht stofflich verwertet werden konnten, recycelt werden. Dadurch werden Sekundärmaterialien verfügbar gemacht, es kommt zu wirtschaftlichen Impulsen für die Recyclingwirtschaft und gleichzeitig verringert sich dadurch der Bedarf an Primärmaterialien. Die Abfallmengen die thermisch verwertet oder deponiert werden, reduzieren sich.
- **Materialeinsparung bei der Lampenproduktion:** Durch Effizienzgewinne in der Produktion werden weniger Materialien für die Herstellung von Lampen benötigt. Dadurch kommt es zu einem verringerten Bedarf an Primärmaterialien. Als Folgewirkung werden auch weniger Mengen (in kg nicht Stück) von Altlampen gesammelt. Dadurch reduzieren sich die verfügbaren Sekundärrohstoffe. Zusätzlich verringern sich auch die Abfallmengen, die einer thermischen Verwertung zugeführt oder deponiert werden
- **Verzicht auf Deko-Lampen:** Wenn weniger Deko-Lampen nachgefragt werden, reduziert dies den Absatz von Lampen und den Umsatz der Beleuchtungsindustrie. Damit einhergehend werden auch weniger Primärmaterialien nachgefragt, aber als Folge auch weniger Sekundärmaterialien über Sammlung und stoffliche Verwertung verfügbar gemacht. Zusätzlich verringern sich auch die

Abfallmengen die einer thermischen Verwertung zugeführt oder deponiert werden. Die Reduktion der in Verkehr gebrachten Menge an Deko-Lampen führt auch zu einer anteilsmäßigen Reduktion des Stromverbrauchs.

- **Reduktion von Leuchten ohne austauschbare Leuchtmittel:** Fest verbaute Leuchtmittel können nur schwer separat gesammelt und einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Wenn der Anteil an Leuchten mit nicht austauscharen Lampen reduziert wird, dann können mehr Altlampen einer stofflichen Verwertung zugeführt werden und die Menge an verfügbaren Sekundärmaterialien wird erhöht. Dadurch reduziert sich gleichzeitig auch der Bedarf an Primärmaterialien.
- **Langlebiges Lampendesign:** Durch eine Erhöhung der Lebensdauer müssen weniger Lampen ersetzt werden. Dadurch sinkt die Nachfrage nach und der Absatz von Lampen. Die dadurch verringerten Umsätze für die Lampenindustrie werden teilweise durch die höheren Preie für langlebigere Lampen ausgeglichen. Durch den verringerten Lampenabsatz werden auch weniger Primärmaterialien nachgefragt, aber als Folge auch weniger Sekundärmaterialien über Sammlung und stoffliche Verwertung verfügbar gemacht. Zusätzlich verringern sich auch die Abfallmengen die einer thermischen Verwertung zugeführt oder deponiert werden. Eine Reduktion der in Verkehr gebrachten Mengen durch die Maßnahme “langlebiges Design” führt nicht zu einer anteilsmäßigen Reduktion des Stromverbrauches, da ja nur weniger kaputte Lampen ausgetauscht werden müssen. Die Installierte Leistung bleibt gleich.
- **Beleuchtung als Dienstleistung:** Unternehmen bieten „Beleuchtung als Dienstleistung“ für andere Unternehmen oder Einrichtungen an. Anbieter investieren in den Austausch alter Lampen durch energieeffizientere und langlebigere Modelle, optimieren Beleuchtungsbereiche und übernehmen die Wartung von Beleuchtungssystemen, die wiederum von Kunden gemietet werden. Durch den Austausch von langlebigeren Lampen und die verbesserte Wartung werden weniger Lampen nachgefragt und der Absatz von Lampen verringert sich. Infolgedessen werden auch weniger Primärmaterialien nachgefragt, und auch weniger Sekundärmaterialien über Sammlung und stoffliche Verwertung verfügbar gemacht. Der Verlust an Sekundärmaterialien wird teilweise durch die verbesserte Sammlung der Anbieter ausgeglichen. Der Anbieter kann Einnahmen durch dieses Businessmodell generieren. Eine Reduktion der in Verkehr gebrachten Mengen durch die Maßnahme “Beleuchtung als Dienstleistung” führt nicht zu einer anteilsmäßigen Reduktion des Stromverbrauches- Auch werden potentielle Energieeinsparungen durch den Umstieg auf “Beleuchtung als Dienstleistung”-Services nicht in der Modellierung berücksichtigt. Ebenfalls werden die Umsätze, die Anbieter aus derartigen Businessmodellen erwirtschafte können, nicht berücksichtigt.

Annahmen bezüglich in Verkehr gebrachter, gesammelter und verwerteter Lampentypen

Die Berechnungen der Stoffstromänderungen basieren auf den Daten der Mengen an in Verkehr gebrachten und gesammelten Mengen an Lampen der Stiftung Elektronik-Altgeräte-Register (EAR) aus dem Jahr 2019 (Absatz vor COVID-19 Effekten). Diese Daten sind aufgeschlüsselt nach Gasentladungslampen (GEL) und nicht Gasentladungslampen. In unseren Szenarien werden “Nicht-Gasentladungslampen durch LED-Lampen repräsentiert.” In den Statistiken der Stiftung EAR werden Werte für Lampen ausgewiesen, die Business to Consumers (B2C) und Business to Business (B2B) in Verkehr gebracht werden. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Herstellerregistrierung werden nur die B2C Mengen berücksichtigt, da diese die tatsächlich in Deutschland in Verkehr gebrachten Mengen am besten abbilden (Lightcycle GmbH 23.11.2022).

Bei den in Verkehr gebrachten Lampenmengen betrug der Anteil von GEL im Jahr 2019 noch 32 % (EAR - Stiftung Elektro-Altgeräte Register 2022). Bei den Sammelmengen gibt eine Studie von Tschachtl et al. (2019) an, dass der Anteil von LED-Lampen im Sammelgut lediglich 3,9 % betrug.

Da GEL weitgehend durch LED-Lampen vom Markt verdrängt werden, wird für das Baseline-Szenario ein Anteil von 90 % LED-Lampen an der verkauften Lampenmenge (vgl. auch ähnliche Schätzungen von Kemna et al. 2015b; 2015a) und 60 % an den Sammelmengen angenommen. Bei den gesammelten Lampenmengen wurde eine allgemein höhere Sammelquote von 65 % angenommen.

Für die Berechnung wieviel Prozent der gesammelten Lampen stofflich oder thermisch verwertet bzw. deponiert werden, konnten für GEL Lampen Zahlen von Destatis aus dem Jahr 2018 herangezogen werden: 92,5 % stoffliche Verwertung, 4,3 % thermische Verwertung und 3,2 % Deponierung (Destatis 2018 in UBA 2020c). Für LED-Lampen wurde dieser Wert geschätzt. Für die Berechnung wieviel Prozent % der gesammelten Lampen stofflich oder thermisch verwertet bzw. deponiert werden, konnten für GEL Lampen Zahlen von Destatis aus dem Jahr 2018 herangezogen werden: 92,5 % stoffliche Verwertung, 4,3 % thermische Verwertung und 3,2 % Deponierung (Destatis 2018 in UBA 2020c). Für LED-Lampen wurde dieser Wert geschätzt.

Im Baseline-Szenario wurden folgende Recyclingquoten für LED-Lampen zugrunde gelegt: 52,6 % stoffliche Verwertung, 19,1 % thermische Verwertung und 28,4 % Deponierung. Die Recyclingquote ist geringer als jene von GEL-Lampen, da davon ausgegangen wird, dass ohne Maßnahmen die vermehrt zum Einsatz kommenden Kunststoffe und Elektronik-Komponenten schwerer recycelt werden können.

Tabelle 7-39 zeigt eine Zusammenfassung der Annahmen, die für den Status quo und das Baseline-Szenario getroffen wurden:

Tabelle 7-39: Annahmen bzgl. Lampenmengen und Stückzahl für Berechnungen

Mengen und Stück	Status quo	Baseline 2045
In Verkehr gebrachte Menge an GEL (kg)	4.995.227	1.337.923
In Verkehr gebrachte Menge an NGEL/LED (kg)	10.383.998	10.590.223
In Verkehr gebrachte Stückzahl GEL	55.502.522	14.865.805
In Verkehr gebrachte Stückzahl NGEL/LED	115.377.755	130.743.553
Gesammelte Mengen GEL (kg)	7.907.520	3.101.319
Gesammelte Mengen LED (kg)	329.480	4.651.979
Gesammelte Stück GEL	87.861.333	34.459.101
Gesammelte Stück LED	3.660.889	57.431.835
Mengen stoffliche Verwertung GEL (kg)	7.314.456	2.868.720
Mengen stoffliche Verwertung LED (kg)	173.314	2.447.049

Quelle: Eigene Auswertung

Annahmen bezüglich Lampeneigenschaften und Preisen

Zur Aufschlüsselung der Materialströme in einzelne Materialfraktionen wurden verschiedene „Bill of Materials“ (also Auflistungen der in den Lampen verbauten Materialien) verschiedener Lampenmodelle verwendet. Zur Berechnung der Stückzahlen wurden die durchschnittlichen Gewichte dieser Lampenmodelle verwendet. Im Folgenden werden die Abschätzungen für die verbauten Materialien, Gewichte und Preise näher erklärt.

Materialfraktionen: Für GEL-Lampen wurden die Materialfraktionen eines Modells einer Kompaktlampe sowie einer Röhrenlampe kombiniert. Aus den angegebenen Bills of Materials wurden dann

gewichtete Mittelwerte berechnet. Die Materialanteile der Röhrenlampen wurden mit 0,7 und die der Kompaktlampen mit 0,3 gewichtet, basierend auf dem höheren Anteil der Röhrenlampen am Sammelmaterial (70 %; Tschachtli et al. 2019). Für LED-Lampen wurde die Durchschnittswerte aus unterschiedlichen Kompaktlampen berechnet.

Tabelle 7-40: Annahmen bzgl. durchschnittlicher Materialfraktionen für GEL und LED-Lampen

Mengenanteile Materialfraktionen	GEL	LED
Aluminium	1,3 %	27,6 %
Buntmetalle (Messing, Nickel etc.)	0,01 %	4,7 %
Calciumcarbonat	1,08 %	0 %
Glas	76,9 %	0 %
Elektronikkomponenten	8,42 %	28,4 %
Kunststoffe (leicht und schwer)	6,83 %	31,7 %
Kupfer	0,6 %	0 %
Phosphor	1,35 %	0 %
Quecksilber	0,004 %	0 %
Resine	0,82 %	0 %
Silikon	0,01 %	6,2 %
Stahl und eisenhaltige Metalle	0,34 %	1,5 %
Wolfram	0,01 %	0 %
Weitere Materialien GEL	2,28 %	0 %

Quelle: Eigene Auswertung

Zusätzlich zu den obigen Bill of Materials wurde für die Berechnung der seltenen Erden bzw. Kritischen Rohstoffe auch Werte für die verwendeten relevanten Elemente je Weißlicht-LED herangezogen: Indium: 29 µg[50], Gallium 33 µg, Cerium 2 µg, Europium 0,4-0,9 µg, Gadolinium 15 µg und Yttrium 32 µg (Buchert et al. 2012).

Lampengewichte: In Anbetracht der Gewichte der Beispiellampen wurde das Durchschnittsgewicht für LED auf 81 g und für GEL auf 90 g für das Baseline-Szenario festgelegt. Diese Werte spiegeln auch den Trend der sich verringernden, durchschnittlichen Lampengewichte im Sammelgut wider (Tschachtli et al. 2019). Diese resultierenden Stückzahlen sind immer noch eine konservative Schätzung (siehe Kemna et al. 2015a; 2015b).

Preise: Die Marktpreise von LED-, und GEL-Lampen wurden auf online Handelsplattformen recherchiert. Zusätzlich wurden noch Kosten für die stoffliche und thermische Verwertung sowie für die Deponierung von Lampenmengen gemäß den Entsorgungskosten aus dem Elektrogesetz (900 € je Tonne) geschätzt.

[50] Mikrogramm

Annahmen bezüglich Energieeffizienz und Stromverbrauch

Der Stromverbrauch für Beleuchtung betrug in Deutschland 2021 ca. 66 TWh (AGEB 2022). Aufgrund der fortlaufenden Transformation des Beleuchtungssektors (Austausch von GEL durch effizientere LED-Lampen), ist davon auszugehen, dass sich der durch Beleuchtung verursachte Stromverbrauch bis zum Jahr 2045 reduziert. Um diese Entwicklung abzubilden, wurde auf die Ergebnisse aus der Studie zur zukünftigen Entwicklung des Beleuchtungssektors in der EU im Auftrag der Europäischen Kommission (Kemna et al. 2015a; 2015b) zurückgegriffen. Für das Baseline-Szenario wurde eine Reduktion gemäß des Business as usual-2030-Szenarios, um 23 % angenommen. Für die einzelnen Circular-Economy Maßnahmen wurde keine Steigerung der Energieeffizienz der in Verkehr gebrachten Lampen angenommen und auch nur bei der Maßnahme “Verzicht auf Deko-Lampen" wurde eine Reduktion des Stromverbrauches berücksichtigt (siehe unten).

Weitere Annahmen bezüglich einzelner Maßnahmen:

Erhöhung der Sammelquote: Aktuell beträgt die Sammelquote für Altlampen ca. 53 % Stiftung (EAR - Stiftung Elektro-Altgeräte Register 2022) und liegt damit höher als jene für Altelektrogeräte insgesamt (ca. 45 % UBA 2022a). Für das Baseline-, und Technologie-Szenario wird angenommen, dass das Ziel des Elektrogesetzes von 65 % erreicht wird. Im Verhalten-, und Mix-Szenario wird sogar eine Sammelquote von 75 % angenommen. Von dieser Maßnahme sind nur Lampen betroffen, die nicht durch die Maßnahme Beleuchtung als Dienstleistung abgedeckt wurden (siehe unten). Für die Szenarien wird dadurch folgende Änderungen der gesammelten Mengen and Altlampen gegenüber dem Baseline-Szenario angenommen: Technologie: -376 Tonnen; Verhaltensweisen: +1.606 Tonnen; Mix: +1.197 Tonnen.

Der Grund für die stärker reduzierten Sammelmengen im Technologie-, und Mix-Szenario im Vergleich zum Verhalten-Szenario ist, dass die Lampen in diesen Szenarien aufgrund von Materialeinsparungen leichter als im Verhalten-Szenario sind. **Vermehrte stoffliche Verwertung von Altleuchten:** Im Baseline-Szenario wird angenommen, dass die Elektrokomponenten von LED-Lampen nicht stofflich verwertet werden können und 60 % der Kunststoffe thermisch verwertet werden. Im Technologie-Szenario wird nun angenommen, dass aufgrund technischer Fortschritte bei Trennverfahren 80 % der Elektrokomponenten einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Im Verhalten-Szenario wird hingegen angenommen, dass Kunststoffe für Globen und Röhren wieder Großteils durch Glas ersetzt werden, da dieses leichter zu recyceln ist. Im Mix-Szenario finden sowohl die Annahmen für Elektronik als auch für die Substitution von Kunststoff durch Glas Anwendung.

Materialeinsparung bei der Lampenproduktion: Für das Technologie-, und Mix-Szenario wurde eine Materialeinsparung bei LED-Lampen in einem ähnlichen Ausmaß wie bei dem Versuchsprojekt angenommen (25 %). Bei den beiden anderen Szenarien wird hingegen nur von moderaten Einsparungen von 10 % angenommen. Aufgrund ihrer geringeren Bedeutung wird bei GEL nur mit geringeren technischen Weiterentwicklungen gerechnet (5 % in Technologie-, und Mix-Szenario). Für die Szenarien wird dadurch folgende Reduktion des Bedarfs an Lampenmaterialien gegenüber dem Baseline-Szenario angenommen: Technologie: -1.655 Tonnen; Verhalten: -181 Tonnen; Mix: 1.655 Tonnen.

Verzicht auf Deko-Lampen: Elliott et al. (2019) definieren den Begriff Deko-Lampe und schätzt auch den Anteil an Deko-Lampen an der Gesamtstückzahl und abgesetzten Lampen in den USA auf 17 %. Da für Deutschland keine vergleichbaren Zahlen gefunden wurden, wurden diese Werte übernommen. Im Verhalten- und im Mix-Szenario wurde von einer Reduktion des Absatzes von Deko-Lampen um 50 %. Bei dem Baseline-, und Technologie-Szenario hingegen erhöht er sich um 10 % (siehe Begründung). Die Anzahl der Deko-Lampen verringert sich im Vergleich zum Baseline-

Szenario wie folgt: Technologie-Szenario: 0; Verhalten-Szenario: -13.335.842; Mix-Szenario: -13.335.842;

Durch die Änderung des Absatzes von Deko-Lampen kommt es zu einer Änderung des Stromverbrauches. Hierfür wird angenommen, dass sich der relevante Lampenbestand bis 2045 gemäß den angenommenen Veränderungen des Absatzes der Deko-Lampen verändert. Als relevanter Lampenbestand werden Lampen gesehen, die privaten Haushalten und Gewerbe zuzurechnen sind.,. Der angenommene Stromverbrauch für diesen Lampenbestand im Baseline-Szenario betrug 41,6 TWH.

Reduktion von Leuchten ohne austauschbare Leuchtmittel: Für die Modellierung dieser Maßnahme waren mehrere Abschätzungen notwendig. Zunächst wurde der Anteil der Leuchten mit festverbauten Leuchtmitteln geschätzt. Laut Dünnhoff und Palm (2017) hatten 29 % aller untersuchten Leuchten in Gebäude- und Wohnungsmärkten festverbaute Leuchtmittel. Da diese Daten sich nur auf bestimmte Lampenbauformen beziehen wurden andere Bauformen ausgeschlossen. Hierfür wurden Daten von Elliott et al. (2019) herangezogen, wonach 21 % der Bautypen nicht für die untersuchten Leuchten geeignet waren (linear; low and high bay, parking lot, building exterior, roadway, other). Die Daten wurden für Deutschland übernommen. Dementsprechend wurden 21 % der in Verkehr gebrachten Mengen ausgeschlossen. Zusätzlich wurden auch noch alle Lampen ausgeschlossen, die durch die Maßnahme „Beleuchtung als Dienstleistung“ abgedeckt werden (siehe unten). Im Verhalten- und im Mix-Szenario wurde von einer Reduktion des Anteils an Leuchten mit festverbauten Leuchtmitteln 9 % ausgegangen. Im Gegensatz dazu kommt es im Technologie-Szenario zu einer Erhöhung des Anteils an Leuchten mit festverbauten Leuchtmitteln auf 39 %. Im Baseline-Szenario kommt es zu keiner Veränderung (siehe Begründung). Für die Szenarien wird dadurch folgen Änderungen der gesammelten Mengen and Altlampen gegenüber dem Baseline-Szenario angenommen: Technologie: -199 Tonnen; Verhaltensweisen: +1.085 Tonnen; Mix: +900 Tonnen. Der Grund für die stärker reduzierten Sammelmengen im Technologie-, und Mix-Szenario im Vergleich zum Verhalten-Szenario ist, dass die Lampen in diesen Szenarien aufgrund von Materialeinsparungen leichter sind als im Verhalten-Szenario.

Langlebiges Lampendesign: Für das Technologie-Szenario wird eine Lebensdauer von 40.000 Stunden, im Verhalten-Szenario eine von 45.000 Stunden und im Mix-Szenario von 50.000 Stunden angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass eine Verlängerung der Lebensdauer, die Nachfrage an Lampen im gleichen Verhältnis reduziert, in dem sich die Lebensdauer erhöht. Was in dieser Rechnung ignoriert wird, ist das ein Teil der Nachfrage an Lampen nicht durch die Lebensdauer beeinflusst wird (z.B. beim Neubau von Gebäuden). Dementsprechend werden die Wirkungen der Maßnahme überschätzt. Wieder wurden von dieser Maßnahme nur Lampen betroffen, die durch die Maßnahme „Beleuchtung als Dienstleistung“ abgedeckt wurden. Eine Reduktion der in Verkehr gebrachten Mengen durch die Maßnahme “langlebiges Design” führt nicht zu einer anteilsmäßigen Reduktion des Stromverbrauches, da ja nur weniger kaputte Lampen ausgetauscht werden müssen. Für die einzelnen Szenarien wurden auch Änderungen in den Lampenpreisen durch die Verlängerung der Lebensdauer abgeschätzt. Zusätzlich wurde angenommen, dass sich im Technologie-, und im Mix-Szenario die Produktionskosten durch technischen Fortschritt stark verringern. Daraus ergeben sich folgende Verteuerungsraten in den verschiedenen Szenarien: Technologie: +20 %; Mix: +50 % (gleicher technischer Fortschritt wie im Technologie-Szenario aber noch höhere Lampenlebensdauer); Verhalten +200 %. Die Anzahl der in Verkehr gebrachten Lampen verringert sich im Vergleich zum Baseline-Szenario wie folgt: Technologie-Szenario: -36.913.373; Verhalten-Szenario: -44.203.493; Mix-Szenario: -49.515.773;

Beleuchtung als Dienstleistung: In einem ersten Schritt musste das theoretische Markpotenzial von Beleuchtung als Dienstleistung abgeschätzt werden. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von Studien erfolgte dies durch folgende Annahmen: (i) Beleuchtung als Dienstleistung ist für private

Haushalte nicht interessant. (ii) Beleuchtung als Dienstleistung ist nur in Betrieben interessant, die noch nicht auf den aktuellen Stand der Technik umgerüstet haben. Für die erste Annahme wurde ein Anteil von 36 % an Lampen in Gewerbebetrieben geschätzt (Kemna et al. 2015a; 2015b). Für die zweite Annahmen wurde eine Durchsetzungsgrad mit LED-Lampen in Gewerbe- und Industriebetrieben von 40 % geschätzt (Elliott et al. 2019). Dieses wird als Näherungswert für jene Betriebe gesehen, für die sich ein Wechsel auf Beleuchtung als Des Weiteren wird angenommen, dass bei dem Wechsel auf Beleuchtung als Dienstleistung auf Lampen mit einer hohen Lebensdauer (60.000) umgerüstet wird. Dadurch sinkt der Bedarf an in Verkehr zu bringenden Lampen in den einzelnen Szenarien gegenüber dem Baseline-Szenario wie folgt: Technologie-Szenario: -37.461; Verhalten-Szenario: -12.214.360; Mix-Szenario: -15.373.093;

In den Modellierungen wurden weder die sich theoretisch ergebende Reduktion des Strombedarfs noch mögliche Umsätze, die Anbieter durch dieses Businessmodell erwirtschaften können, berücksichtigt.

Tabelle 7-41 aggregiert die Daten aus den einzelnen Circular-Economy Maßnahmen und bietet einen eine Übersicht über die Wirkungen aller Maßnahmen auf die Stoffströme in den einzelnen Szenarien.

Tabelle 7-41: Übersicht angenommenen Änderungen Materialströme in Szenarien

Mengen und Stück	Änderungen von Status quo zu Baseline (2045)	Änderungen von Technologie-Szenario zu Baseline	Änderungen von Verhalten-Szenario zu Baseline	Änderungen von Mix-Szenario zu Baseline
In Verkehr gebrachte Menge an GEL (t)	-73 %	-5 %	0 %	-5 %
In Verkehr gebrachte Menge an LED (t)	+3 %	-44 %	-74 %	-83 %
In Verkehr gebrachte Stückzahl GEL	-73 %	0 %	0 %	0 %
In Verkehr gebrachte Stückzahl LED	+13 %	-26 %	-48 %	-54 %
Gesammelte Mengen GEL (t)	-58 %	+6 %	+37 %	+25 %
Gesammelte Mengen LED (t)	+930 %	-43 %	-26 %	-50 %
Gesammelte Stück GEL	-58 %	+11 %	+37 %	+33 %
Gesammelte Stück LED	+1026 %	+24 %	-9 %	-17 %
Mengen stoffliche Verwertung GEL (t)	-58 %	+6 %	+37 %	+25 %
Mengen stoffliche Verwertung LED (t)	+930 %	-22 %	+43 %	+23 %

Quelle: Eigene Auswertung

Die Wirkungen der einzelnen Circular-Economy-Maßnahmen wurden in Materialfraktionen und in ökonomische Impulse umgerechnet. Diese Daten waren dann die Grundlage für die weitere Modellierung der Wirkkategorien mittels EMIRO.

Festlegungen und Annahmen für die Rohstoffbilanzierung

Auf Grundlage der Materialmassen an benötigtem Primärmaterial und zur Verfügung gestellten Sekundärmaterial, die von den Sektorexpert*innen ermittelt wurden, wurden die Veränderungen von Bedarf und Sekundärangebot als relative Veränderungen ausgedrückt. Die Veränderungspotenziale ergeben sich aus dem Produkt dieser relativen Änderung der Materialmassen und den Sektoranteilen der jeweiligen Rohstoffe. Alle Maßnahmen wurden rohstoffspezifisch betrachtet.

7.2.8 Verpackungen

Bei der Modellierung wurden den drei Maßnahmenbündeln folgende Einzelmaßnahmen zugeordnet:

1. Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend verhaltensbedingte Maßnahmen:

- Reduktion von Produktabfällen
- Verzicht auf ausgewählte Produkte
- Unverpackte Distribution
- Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder andere wiederverwendbare Behälter
- Nutzung von Nachfüllbeuteln
- Veränderung der Produktdarreichung

2. Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend technikbedingte Maßnahmen:

- Vermeidung von Umverpackungen
- Reduktion überdimensionierter Verpackungen
- Vermeidung sonstiger funktionsloser Verpackungen
- Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen
- Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten
- Reduktion von Verpackungsfunktionen

3. Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz

- Design-for-Recycling
- Optimierung der Getrenntsammlung
- Steigerung von Sortier- und Recyclingeffizienzen
- Steigerung des Einsatzes von Rezyklaten

Die Modellierungen zu den Reduktionsmaßnahmen (Maßnahmenbündel 1 und 2) basieren auf einer Arbeit von Cayé und Schüler (2022). Diese wurde nach Abstimmungen mit dem Projektteam unter Nutzung der umfassenden Arbeiten und – zum größten – Teil unveröffentlichten Daten von GVM aus Marktanalysen zu Verpackungen zielgerichtet für diese Modellierungen erstellt. Die Originalstudie „Schätzung ambitionierter Vermeidungspotenziale bei Verpackungen in Deutschland“ (Cayé und Schüler 2022) wird als Anhang (Kapitel 7.5) beigefügt. Darin sind alle Daten und Annahmen zu den Maßnahmenbündeln 1 und 2 enthalten. Deshalb werden in diesem Kapitel etwas intensiver die Annahmen zur Modellierung des 3. Maßnahmenbündels „Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz“ beschrieben, die auf zahlreichen Studien und Workshops des

Öko-Instituts und HTP bzw. Institut cyclos-HTP basieren (z.B. Christiani 2022; 2017b; Bulach et al. 2022a; Bulach et al. 2022b; Christiani und Dehoust 2012; Christiani 2017a). Die modellierten Mengen an Verpackungsmaterialien für Glas, Papier, Kunststoffe, Aluminium, Eisenmetalle (insbesondere Weiß- und Feinblech), Flüssigkarton, Holz und Sonstige sowie deren jeweiligen Verwertungsanteile basieren auf den Daten von GVM (2022).

Tabelle 7-42: CE-Maßnahmen Verpackungen

	Maßnahmenbündel	Beschreibung	R-Strategie
1	Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend verhaltensbedingte Maßnahmen	Siehe hierzu Cayé und Schüler (2022)	Rethink, Reduce, Reuse
2	Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend technikbedingte Maßnahmen	Siehe hierzu Cayé und Schüler (2022)	Rethink, Reduce, Reuse
3	Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz	Ausschöpfung der Potenziale von Design for Recycling	Recycle

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

In den Maßnahmenbündeln 1 und 2 wurden auf der Basis der Daten zu Mengen zum Verpackungsaufkommen (GVM 2022 und Cayé und Schüler 2022) für zahlreiche einzelne Maßnahmen ermittelt, wie hoch das Potenzial ist, um das Aufkommen der einzelnen Verpackungsmaterialien zu reduzieren. Alle Fakten dazu sind Cayé und Schüler (2022) zu entnehmen.

Im Maßnahmenbündel 3 wurden die Potenziale zur Steigerung der Recyclingquoten für die Verpackungen modelliert:

- aus dem privaten Endverbrauch, im Wesentlichen sind dies Papier, Pappe und Karton, Glas und Leichtverpackungen aus den Haushalten und gleichartigen Anfallstellen nach § 3 VerpackG und
- dem nicht-privaten Endverbrauch, im Wesentlichen sind dies Transport- und Umverpackungen sowie der gewerbliche Endverbrauch

Dazu wurden zunächst Einzelmaßnahmen ausgewählt, um die aktuellen Hemmnisse, wie

- Design und Herstellung von Verpackungen, die entweder in den heutigen Sortieranlagen nicht ausgebracht oder die nicht recycelt werden können,
- Verlust von sortier- und recyclingfähigen Verpackungen durch Fehlwürfe bei der Abfallbereitstellung in den Haushalten und dem Gewerbe,
- Fehlende Sortier- und Recyclingkapazitäten für Materialströme für die Recycling unter aktuellen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich ist bzw. der Ausbau der Recyclingkapazitäten aufgrund fehlender Investitionssicherheiten nicht erfolgt.

Tabelle 7-43: Ausprägung der Maßnahmen in den Szenarien (Verpackungen)

	Maßnahme	Base-line	Tech-nologie	Ver-halten	Mix	Schlüsseltreiber
1	Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend verhaltensbedingte Maßnahmen	Nein	Nein	Ja	Ja	Konsumentenverhalten, Schaffung von Unverpackt- und Mehrwegangeboten
2	Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend technikbedingte Maßnahmen	Nein	Ja	Nein	Ja	Design von Verpackungen
3	Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling	Nein	Ja	Nein	Ja	Design for Recycling, Steigerung der getrennten Erfassung von Verpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen, Qualitativer und quantitativer Ausbau der Sortier- und Recyclinginfrastruktur.

Quelle: Eigene Auswertung.

Begründung der Ausprägung

Die Ausprägung der **verhaltens- und technikbasierten Maßnahmen zur Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien** wurde auf der Basis von langjährigen Erfahrungen und Ergebnissen intensiver Markforschung, -analyse und -beobachtung durch GVM erstellt. Basis der Bilanzen war, dass

- die bilanzierten Umstellungen in einigen Bereichen zu „vertretbaren“ Komforteinbußen bei den Verbraucher*innen führen können (z.B. Unverpackt- und Mehrwegsysteme);
- massive Änderungen im Handel und bei den Hersteller*innen in Bezug auf Produkt- und Verpackungsdesign, Verpackung der Produkte und Produktlogistik erfolgen werden;
- keine umfassenden technischen Neuentwicklungen notwendig sein werden;
- alle notwendigen Funktionen der Verpackungen zum Schutz der Produkte erhalten bleiben;
- Veränderungen nur dann erfolgen, wenn sie ökologisch sinnvoll sind (z.B. Mehrweg nur, wenn echte Materialeinsparungen damit verbunden sind).

Alle Details dazu werden in Cayé und Schüler (2022) umfassend beschrieben.

Bei der **Maßnahme zur Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz** wird zunächst davon ausgegangen, dass die Anforderungen des Verpackungsgesetzes, insbesondere die zur getrennten Erfassung, zu den Recyclingquoten und zum Mengenstromnachweis auf alle Verpackungen ausgedehnt werden, also auch auf Transport-, Umverpackungen und Endverpackungen, die in Industrie und Gewerbe anfallen.

Zudem sollen im Technik- und Mixszenario bis 2045 die Potenziale zum Design for Recycling vollständig ausgeschöpft, die Recyclingtechniken auf heute absehbarem Niveau weiterentwickelt, die Sortier- und Recyclinginfrastruktur sowie die getrennte Erfassung auf einem guten Niveau ausgebaut sein (vgl. z.B. Dehoust et al. 2021; Christiani 2017b; Bulach et al. 2022a; Christiani 2017a).

Dies entspricht einerseits den Umweltzielen der meisten großen Hersteller (vgl. z.B. Bulach et al. 2022a), andererseits den politischen Zielen in Deutschland (beispielsweise so im Koalitionsvertrag festgeschrieben) und Europa (siehe Green Deal).

Modellierungsdaten und Annahmen

Genereller Ansatz der Modellierung der Maßnahmen

Als Basis der Bilanzen wurde die Summe der 2020 insgesamt in Deutschland in Verkehr gebrachten Verpackungsmaterialien und die je Material erreichten Recyclingquoten herangezogen (GVM 2022). Für das Baseline-Szenario wurde davon ausgegangen, dass der derzeitige Trend zu stetig ansteigenden Verpackungsmengen durch die moderate Umsetzung von aktuell diskutierten Maßnahmen gestoppt werden kann (vgl. hierzu Trunk 2022) und die Mengen 2045 auf dem Niveau des Status Quo bleiben.

Um die Reduktionspotenziale besser abschätzen zu können, wurden neben den Gesamtdaten, auch die Mengen für den privaten Endverbrauch Food und non Food, sowie für den nicht privaten Endverbrauch ausgewiesen (Cayé und Schüler 2022). Für die weiteren Bilanzen wurden die Mengen je Materialart, auch in Abhängigkeit des Rezyklatanteils, mit den spezifischen Preisen je Verpackungsmaterial verrechnet. Auf dieser Basis wurden die durch die betrachteten Maßnahmen erreichbaren Mengenreduktionen je Material sowie die damit einhergehenden Kosteneinsparungen in den betrachteten Branchen bilanziert. Es wurde unterstellt, dass die Kostenreduktionen durch die eingesparten Verpackungsmaterialien und -produktion in etwa den Mehraufwendungen für die Unverpackt- und Mehrweglogistik entsprechen, diese aber in anderen Branchen (Behandlung von Mehrwegflaschen, Servicedienstleistungen und Handel) anfallen.

Tabelle 7-44: Reduktion der Materialmengen in den einzelnen Szenarien im Sektor Verpackungen

Material		Status quo Baseline	Technologie	Verhalten	Mix	Reduktion Mix Zu Baseline
		1.000 Mg	**1.000 Mg**	**1.000 Mg**	**1.000 Mg**	**%**
1.	Glas	3.135,2	2.833,8	2.247,1	1.945,7	-37,9 %
2.	Eisenmetalle	843,5	786,9	761,2	704,6	-16,5 %
3.	Aluminium	139,9	133,6	115,8	109,5	-21,7 %
4.	Kunststoff	3.219,0	2.966,5	2.818,5	2.566,0	-20,3 %
5.	Papier, Pappe, Karton	8.153,9	7.547,3	5.780,4	5.173,8	-36,5 %
6.	Flüssigkeitskarton	182,2	180,7	57,6	56,1	-69,2 %
Summe 1. – 6.		**15.673,7**	**14.448,8**	**11.780,6**	**10.555,7**	**-32,7 %**
7.	Holz, Kork	3.072,0	3.050,7	2.686,9	2.665,6	-13,2 %
8.	Sonst. Packstoffe	31,1	31,0	28,7	28,6	-8,0 %
Summe 1. – 8.		**18.776,8**	**17.530,5**	**14.496,2**	**13.249,9**	**-29,4 %**

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Cayé und Schüler (2022)

Neben Bilanz der absoluten Verpackungsmengen, wurde auch der Rezyklatanteil in der Baseline und dessen Steigerung in den Szenarien Technologie und Mix abgeschätzt (vgl. hierzu Gsell et al. 2022, GVM 2020, CEID 2021, Conversio 2020).

Tabelle 7-45: Bilanzansätze zum Einsatz von Post Consumer Rezyklaten aus werkstofflichem Verpackungsrecycling bei der Produktion von Verpackungen

Material		Status quo, Baseline, Verhalten	Technologie, Mix
		Rezyklatanteil %	Rezyklatanteil %
1.	Glas	40	50
2.	Eisenmetalle	10	30
3.	Aluminium	10	50
4.	Kunststoff	10	25
5.	Papier, Pappe, Karton	40	40
6.	Flüssigkeitskarton	0	20
7.	Holz, Kork	0	0
8.	Sonst. Packstoffe	0	0

Quelle: auf der Basis von Gsell et al. (2022), GVM (2020), CEID (2021), Conversio (2020).

Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend verhaltensbedingte Maßnahmen

Im Szenario Verhalten wurden verhaltensbedingte Maßnahmen bilanziert und zu einem Maßnahmenbündel zusammengefasst. Genaue Beschreibungen zu den einzelnen Maßnahmen sind in Cayé und Schüler (2022) zu finden. Neben den dargestellten Maßnahmen werden für das Szenario Verhalten keine weiteren Maßnahmen betrachtet.

Tabelle 7-46: Reduktion der Materialmengen für Verpackungen durch verhaltensbedingte Maßnahmen in Tsd. Tonnen

Material	Marktmenge in 2020	durch Reduktion von Produktabfällen	durch Verzicht auf bestimmte Produkte	durch unverpackte Distribution	durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder auf andere	durch Nachfüllbeutel	durch Veränderung der Produkt-Darrei-	Marktmenge optimiert	Reduktionspotenzial insgesamt
Glas	3.135,2	-186,2	-140,2	-0,1	-459,9	-101,7		2.247,1	-888,1
Papier	8.153,9	-264,0	-165,3	-138,5	-1.812,0		6,3	5.780,4	-2.373,5
Kunststoffe	3.219,0	-139,4	-267,5	-55,8	170,7	-14,1	-94,4	2.818,5	-400,5
Aluminium	139,9	-6,0	-2,7		-14,1		-1,3	115,8	-24,1
Eisenmetalle	843,5	-27,2	-2,9		-43,5	-7,0	-1,7	761,2	-82,3
Flüssigkeitskarton	182,2	-17,9	-1,2		-105,5			57,6	-124,6
Holz	3.072,0	-109,9	-5,0	-0,4	-269,8			2.686,9	-385,1
Sonstige	31,1	-2,4						28,7	-2,4
Summe Verpackungen gesamt	**18.776,8**	**-752,9**	**-584,7**	**-194,8**	**-2.533,9**	**-122,7**	**-91,0**	**14.496,8**	**-4.280,0**

Hinweis: Alle Angaben in 1.000 Tonnen. Daten von 2020; Quelle: Cayé und Schüler (2022)

Reduktion des Einsatzes von Verpackungsmaterialien durch überwiegend technikbedingte Maßnahmen

Im Szenario Technik wurden technikbedingte Maßnahmen bilanziert und zu einem Maßnahmenbündel zusammengefasst. Genaue Beschreibungen zu den einzelnen Maßnahmen sind in Cayé und Schüler (2022) zu finden. Neben den dargestellten Maßnahmen werden für das Szenario Technik noch weitere Maßnahmen zur Steigerung der Recyclingquoten betrachtet.

Tabelle 7-47: Reduktion der Materialmengen für Verpackungen durch technikbedingte Maßnahmen in Tsd. Tonnen

Material	Marktmenge in	durch Vermeidung von Umverpackungen	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen	durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen	durch Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen	durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten	durch Reduktion von Verpackungsfunktionen	Marktmenge optimiert	Reduktionspotenzial insgesamt
Glas	3.135,2				-193,5	-107,9		2.833,8	-301,4
Papier	8.153,9	-60,4	-47,3	-26,2	-258,8	-129,0	-84,9	7.547,3	-606,6
Kunststoffe	3.219,0	-29,7	-8,0	-15,6	-0,6	-83,8	-114,8	2.966,5	-252,5
Aluminium	139,9			-2,1		-1,5	-2,7	133,6	-6,3
Eisenmetalle	843,5				-47,3	-9,3		786,9	-56,6
Flüssigkeitskarton	182,2					-1,5		180,7	-1,5
Holz	3.072,0					-21,3		3.050,7	-21,3
Sonstige	31,1						-0,1	31,0	-0,1
Summe gesamt	**18.776,8**	**-90,1**	**-55,4**	**-43,9**	**-500,2**	**-354,3**	**-202,5**	**17.530,4**	**-1.246,4**

Hinweis: Alle Angaben in 1.000 Tonnen. Daten von 2020.
Quelle: Cayé und Schüler (2022)

Förderung von hochwertigem Verpackungsrecycling und Rezyklateinsatz

Bei der Betrachtung von Recyclingraten für Verpackungen werden nach dem deutschen Verpackungsgesetz und nach der europäischen Verpackungsrichtlinie unterschiedliche Ansätze verfolgt. Nach VerpackG werden für die vorgegebenen Recyclingquoten die Zuführungsmengen der Materialfraktionen aus der Sortierung in die Aufbereitungsanlagen verstanden. Nach europäischem Recht werden die Verluste in der Aufbereitung nicht in die Quote einbezogen (vgl. hierzu GVM 2022). Die europäischen Vorgaben beziehen sich auf die Marktmenge, die deutschen auf die lizenzierten Mengen. Für die Bilanzen hier werden die Recyclingraten nach GVM (2022) genutzt, die sich nach den Vorgaben der EU-Richtlinie auf die Marktmenge der Verpackungen beziehen. Von den Mengen, die im Recycling landen, werden pauschal noch 2 % Verluste in der Recyclinganlage angesetzt. Die Ergebnisse stellen somit die Menge an Rezyklaten dar, die durch das Verpackungsrecycling zur Verfügung gestellt wird. Durch die Tatsache, dass in den Optimierungsszenarien die verwendeten

Verpackungsmengen insgesamt zurückgehen, können trotz gesteigerter Recyclingraten die absoluten Mengen an produzierten Rezyklaten nur im Technologie-Szenario gesteigert werden (vgl. Tabelle 7-48 und Tabelle 7-49)

Tabelle 7-48: Bilanzansätze der Recyclingraten der einzelnen Verpackungsmaterialien

Szenarien		Status quo, Baseline, Verhalten*	Technologie, Mix**
Material		Recyclingrate	Recyclingrate
		%	%
1.	Glas	78	83
2.	Eisenmetalle	86	89
3.	Aluminium	61	72
4.	Kunststoff	47	71
5.	Papier, Pappe, Karton	81	87
6.	Flüssigkeitskarton	76	88
7.	Holz, Kork	31	64
8.	Sonst. Packstoffe***	0	40
	Gew. Mittel	**66**	**80**

* Berechnet auf der Basis der Daten aus GVM (2022).
** Ergebnis der Maßnahmen nach Christiani (2022).
*** Die Steigerung der Recyclingrate bei sonstigen Packstoffen basiert auf der Annahme, dass diese in entsprechendem Umfang durch recyclingfähige Materialien ersetzt werden.

Tabelle 7-49: Durch das mechanische Verpackungsrecycling zur Verfügung gestellte Rezyklatmengen

Material		Status quo, Baseline	Verhalten	Technologie	Mix
		Rezyklat-menge	Rezyklatmenge	Rezyklatmenge	Rezyklatmenge
		1.000 t	1.000 t	1.000 t	1.000 t
1.	Glas	2.450	1.756	2.361	1.621
2.	Eisenmetalle	721	651	699	626
3.	Aluminium	86	71	96	79
4.	Kunststoff	1.502	1.315	2.112	1.827
5.	Papier, Pappe, Karton	6.596	4.676	6.572	4.505
6.	Flüssigkeitskarton	138	44	159	49
7.	Holz, Kork	959	839	64	1.718
8.	Sonst. Packstoffe	0	0	12,2	11
	Summe	12.452	9.351	13.977	10.436

Quelle: Eigene Berechnung

Durch die Reduktion der eingesetzten Verpackungsmaterialien und die Steigerung der Recyclingraten gehen die Mengen an Verpackungsabfälle, die energetisch verwertet werden, deutlich zurück. Während im Status quo und in der Baseline noch 5,4 Mt (29 %) der Verpackungsabfälle verbrannt wurden, waren es im Szenario Verhalten 4,7 Mt (33 %), im Szenario Technologie 3,2 Mt (18 %) und im Szenario Mix 2,6 Mt (19 %).

Um die Steigerung der Recyclingraten zu erreichen, müssen mehr Verpackungen recyclinggerecht designt werden. Dazu gehört, dass auf Materialien (z.B. PVC) und Zusatzstoffe (bestimmte Kleber, Farben, Weichmacher u.Ä.), die das Recycling stören, verzichtet wird bzw. dass diese durch recyclinggerechte Alternativen ersetzt werden. Die Anzahl der je Verpackung verwendeten Materialien und Zusatzstoffe soll zudem verringert und harmonisiert werden. Es wird davon ausgegangen, dass damit, von wenigen Ausnahmen abgesehen, nahezu alle Verpackungen so designt werden, dass mindestens 90 %, im Normalfall 95 % der eingesetzten Materialien recycelt werden können (vgl. z.B. Bulach et al. 2022a, Christiani 2017a, CHI 2021). Von den in privaten Haushalten und gleichartigen Sammelstellen nach § 3 VerpackG gesammelten Leichtverpackungen sind laut einer Analyse der LVP-Sammelfraktion aus 2017 etwa 25,4 % verwertbare Verpackungen aus PPK und PPK Verbunde, Weißblech, Aluminium sowie Flüssigkeitskartons, 32,0 % werkstofflich verwertbare Kunststoffverpackungen und 16,8 % werkstofflich nicht verwertbare Kunststoffverpackungen und Kunststoff-Nichtverpackungen. 25,8 % der LVP-Sammelware sind Reste und Sonstiges (Christiani 2017b). Für die Bilanzen wurde angesetzt, dass der Anteil der Verpackungen, die derzeit nicht recycelbar sind, durch die Kombination der Einzelmaßnahmen „Design for Recycling“ und „Steigerung von Sortier- und Recyclingeffizienzen“ auf etwa 5 % Prozent oder weniger reduziert werden können (Christiani 2022, Dehoust et al. 2021).

Darüber hinaus wird die getrennte Erfassung von Verpackungsabfällen, im Optimalfall zusammen mit stoffgleichen Nichtverpackungen, erheblich gesteigert. Dies muss sowohl in den privaten Haushalten als auch in Industrie und Gewerbe erfolgen. Die Potenziale in privaten Haushalten liegen nach Auswertungen der bundesweiten Haushaltsanalysen (Dornbusch et al. 2020) bei etwa 800.000 t/a bei ausschließlicher Optimierung der getrennten Erfassung von Verpackungen und bei 1,2 Mt/a bei einer bundesweiten Ausdehnung auf stoffgleiche Nichtverpackungen (Bulach et al. 2022b). Im Bereich von Industrie und Gewerbe werden bei schlechter Datenlage noch erhebliche Potenziale von mehr als 2 Mt/a vermutet, die durch eine konsequente Umsetzung der Gewerbeabfallverordnung (Knappe et al. 2023) in Verbindung mit einer Ausweitung der Anforderungen des VerpackG auf alle Abfälle (Bulach et al. 2022b) erschlossen werden können. Damit wäre eine Erfassung der Verpackungsabfälle von insgesamt mehr als 90 % erreicht, was nur mit konsequenter Umsetzung der vorgeschlagenen Instrumente erreicht werden kann.

Annahmen zur Rohstoffbilanzierung

Die Veränderungspotenziale wurden auf Grundlage von Gesamtmaterialaufkommen und Recyclingmengen von Glas und Aluminium (in t) berechnet. Die Veränderungen wurden als prozentuale Angaben ausgedrückt und die Daten zu Glasverpackungen als Proxy für Quarzsand, Selen und Kobalt verwendet. Es wurde also angenommen, dass sich die Rohstoffbedarfe und -angebote dieser Rohstoffe gleichermaßen und proportional zum Verpackungsglasbedarf und -angebot verändern.

7.3 Narrative der vier MDCE-Szenarien

Baseline-Szenario

Im Baseline-Szenario gibt es keine weiteren Anstrengungen, um Circular Economy in Deutschland zu etablieren. Das bedeutet, dass keine der mit Circular Economy verbundenen Handlungsstrategien (z.B. Verlangsamung von Ressourcenflüssen, Nutzungsintensivierung von Produkten, Verringerung von Ressourcenströmen und auch das Schließen von Ressourcenkreisläufen, Materialsubstitution) besondere Aufmerksamkeit erfährt. Es werden zwar vereinzelt Maßnahmen umgesetzt, die diesen Strategien zuzurechnen sind, dabei handelt es sich aber lediglich um Maßnahmen, die bereits in anderen Zusammenhängen angekündigt wurden und nicht um neue Anstrengungen.

Das Baseline-Szenario geht auch von stabilen Rahmenbedingungen aus, wobei stabil hier nicht bedeutet, dass es keine Änderungen zum Status quo gibt, sondern, dass sich relevante Rahmenbedingungen gemäß aktueller Trendvorschreibungen und Vorhersagen entwickeln. Technologische Entwicklungen schreiten stetig voran, es kommt aber zu keinen radikalen Innovationen und Umbrüchen. Das Konsumverhalten der Bevölkerung in Deutschland und anderer Akteure (Unternehmen, Staat etc.) ändert sich nur moderat.

Produktionsseitige Ambitionen der Politik: Hier wird davon ausgegangen, dass die produktionsbedingten Maßnahmen gemäß dem Projektionsbericht 2021 umgesetzt werden. Zusätzliche Anstrengungen werden durch die Politik nicht unternommen.

Konsumseitige Ambitionen der Politik: Hier wird davon ausgegangen, dass die konsumbezogenen Maßnahmen gemäß dem Projektionsbericht 2021 umgesetzt werden. Zusätzliche Anstrengungen werden durch die Politik nicht unternommen.

Technologischer Fortschritt: Digitalisierung hat in vielen Bereichen des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Lebens eine zentrale Rolle eingenommen. Technologien, die im Jahr 2022 einen bestimmten Reifegrad erreicht haben, haben sich am Markt etabliert. Die im Projektionsbericht 2021 getroffenen Annahmen zur Umsetzung von Technologien in den jeweiligen Sektoren sind eingetroffen. Weitere große technologische Umbrüche haben nicht stattgefunden. Wo erwähnt, entspricht die technologische Weiterentwicklung dem Projektionsbericht 2021.

Konsumveralten: Die Kaufkraft in Deutschland stagniert bis zum Jahr 2045. Das Konsumverhalten ändert sich nur moderat in Richtung mehr Nachhaltigkeit. Beispielsweise reduziert sich der Fleischkonsum langsam. Es gibt aber keine generelle Abkehr vom Massenkonsum und Reorientierung zu hochqualitativen, (teuren) nachhaltigeren Produkten und technische, produktionsseitige Lösungen.

Technologie-Szenario

Im Technologie-Szenario wurden bis zum Jahr 2045 hauptsächlich technische Lösungen eingesetzt, um eine Circular Economy in Deutschland zu etablieren. Das Ziel ist, Produktionsprozesse effizienter zu gestalten und damit zusammenhängende Stoff-, und Energiekreisläufe zu schließen. Konsum spielt insofern eine geringere Rolle, da es hier v.a. gilt, Reststoffe wieder in den Produktionsprozess zurückzuführen.

Der Fokus in diesem Szenario liegt auf den Handlungsstrategien Ressourcenströme verringern (weniger Einsatz von Ressourcen je Produkteinheit), Materialsubstitution und das Schließen von Ressourcenkreisläufe durch neue technische Recyclingverfahren. Die Verlangsamung von Ressourcenflüssen und vor allem die intensivere Nutzung von Produkten spielt dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

Der genannte Fokus ist in dem Szenario vielversprechend, da hier von einem rapiden technischen Fortschritt in den relevanten Industrien und Sektoren ausgegangen wird. Die Politik hat diese technologischen Innovationen in den letzten 25 Jahren stark begünstigt und fördert ihre Nutzung zur Erreichung von Nachhaltigkeits-, und Klimazielen. Das Konsumverhalten der Bevölkerung in Deutschland hat sich hingegen kaum geändert, da es hier keine Lenkungsmaßnahmen der Politik gab und die effizientere Produktion es erlaubte, Konsummuster beizubehalten.

Produktionsseitige Ambitionen der Politik: Die Politik hat in den letzten 25 Jahren technische Innovationen stark durch monetäre und informative Politikinstrumente gefördert. Das Ziel hierbei war es, die vorhandenen technischen Potenziale in der Produktion auszuschöpfen und auch neue Potenziale zu erschließen. Es geht nicht darum, durch politische Maßnahmen Produktion oder Wachstum einzuschränken, sondern effizienter zu gestalten. Generell wird Unternehmen von der Politik viel Vertrauen entgegengebracht und Verantwortung übertragen. Die Politik setzt Ziele und fördert Unternehmen bei der Erreichung derselben. Ordnungsrecht spielt bei der Gestaltung von Produktionsprozessen nur eine untergeordnete Rolle. Wenn jedoch sich durch die Innovationskraft von Unternehmen neue und nachhaltigere Produktionsstandards etabliert haben, dann werden diese festgeschrieben.

Konsumseitige Ambitionen der Politik: Es gibt von Seiten der Politik im Vergleich zum Baseline-Szenario keine großen zusätzlichen Maßnahmen zur Gestaltung der Politik.

Technologischer Fortschritt: In den letzten 25 Jahren ist es zu einem rapiden technologischen Fortschritt gekommen. Künstliche Intelligenz und Digitalisierung bestimmen das wirtschaftliche und gesellschaftliche Leben. Technologische Innovationen in den Bereichen Biotechnologie, Informationstechnologie, Energie, Mobilität und Materialwissenschaften, die 2020 noch in den Kinderschuhen steckten, haben sich bereits etabliert. Durch diese Innovationen ist es in allen im Projektionsbericht 2021 erwähnten „Sektoren“ (Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Landnutzung) zu großen Effizienzgewinnen gekommen. Ebenso erlaubt der technische Fortschritt die Produktion von langlebigeren Produkten.

Konsumveralten: Das Konsumverhalten der Bevölkerung in Deutschland hat sich seit dem Jahr 2020 nur geringfügig verändert und entspricht etwa dem Baseline-Szenario. Die Effizienzgewinne in der Produktion und fehlender politischer Druck erlaubten es, bestehende Konsummuster weitgehend beizubehalten. Es gibt keine große Hinwendung zu auf Suffizienz ausgerichtete Lebensstile, sondern nur einen moderaten, langsamen Wandel zu nachhaltigerem Konsum (z.B. geringerer Fleischkonsum). Die reale Kaufkraft stagniert etwa auf dem Niveau von 2020.

Verhalten-Szenario

Im Verhalten-Szenario wird eine Circular Economy in Deutschland nicht durch technische Lösungen oder Umgestaltung der Produktionsprozesse umgesetzt, sondern vor allem durch eine Änderung des Konsumverhaltens der Bürger*innen sowie anderer Akteure (Unternehmen etc.). Die Änderungen ergeben zum einen dadurch, dass sich zunehmende auf Suffizienz ausgerichtete Lebensstile durchsetzen, zum anderen aber auch eine aktive Lenkung des Konsumverhaltens durch die Politik.

Dementsprechend stehen in diesem Szenario die Handlungsstrategien „Nutzung von Produkten intensivieren“ und „Ressourcenflüsse verlangsamen“ im Vordergrund. Kreislaufwirtschaft wird dadurch etabliert, dass Produkte durch verstärkte Reparatur und Wideraufbereitung länger genutzt werden können (langlebiges und reparaturfreundliches Design). Gleichzeitig wird die Nutzung von Produkten durch verschiedene Formen des Teilens (z.B. Sharing Konzepte, Product-as-a-Service) intensiviert. Verringerung von Ressourcenströme und das Schließen von Kreisläufen spielen auch

eine Rolle, allerdings nicht in Form technischer Neugestaltung von Produktionsprozessen und einer Erhöhung von Ressourceneffizienz. Vielmehr wird Ressourcenströme durch verminderten Konsum verringert. Die Substitution von bedenklichen Materialen durch neue technische Möglichkeiten spielt in diesem Szenario keine besondere Rolle.

Die Welt, die in diesem Szenario beschrieben wird, wendet sich zunehmend von dem Wachstumsparadigma ab. Die – auch durch die Politik geförderten – sich veränderten Konsummuster haben eine wachstumsdämpfende Wirkung auf Märkte und Produktion. Auf Suffizienz ausgerichtete Lebensstile stehen in Konflikt mit Massenkonsum. Kurzlebige Moden und Trends, die zum Kauf von Produkten anregen, finden sich in diesem Szenario selten. Aufgrund dieser Drosselung der Produktion ist die technologische Entwicklung langsam vorangeschritten.

Produktionsseitige Ambitionen der Politik: Die Politik unternimmt wenig Anstrengungen, um technische Innovationen, die Effizienzsteigerungen versprechen, zu fördern. Stattdessen werden in der Regel Maßnahmen unterstützt, die Produkte langlebiger und reparaturfreundlicher machen und die Serviceorientierung von Produktionsprozessen fördern. Diese Maßnahmen beschränken sich nicht nur auf monetäre und informative Politikinstrumente, sondern es werden auch neue Regulierungen und Mindeststandards erlassen.

Konsumseitige Ambitionen der Politik: Nachhaltiger Konsum wird in diesem Szenario stark über Ordnungsrecht und Fiskalpolitik gefördert. Fiskalische Instrumente werden genutzt, um externalisierte Kosten von Produkten zu internalisieren. Ordnungsrecht setzt Standards und auch Verbote für Produktgruppen um. Der Staat greift in einem hohen Maße in das Konsumverhalten ein, um dieses Nachhaltige zu gestalten. Staatlicher „Konsum“ (öffentliche Beschaffung) erfolgt nach strikten Nachhaltigkeitskriterien.

Technologischer Fortschritt: Der technologische Fortschritt hat sich durch die wachstumsdämpfenden Maßnahmen und Verhaltensänderungen teilweise verlangsamt. Industrien, die mit einem starken Markteinbruch zu kämpfen haben, haben teilweise die Innovationstätigkeit zurückgefahren. Allerdings gibt es auch in bestimmten Bereichen, die Schlüsseltechnologien für die Handlungsstrategien in diesem Szenario bereitstellen (z.B. Reparatur, langlebiges Design etc.) auch eine rasche technologische Weiterentwicklung gegeben.

Konsumveralten: Das Konsumverhalten der Bürger*innen in Deutschland sowie anderer Akteure (Unternehmen, Staat etc.) hat sich in den letzten 25 Jahren stark gewandelt. In der Bevölkerung dominieren zusehends auf Suffizienz ausgerichtete Lebensstile, die nicht im Einklang mit dem Massenkonsum von kurzlebigen Produkten ist. Zusätzlich wird auch durch Preissignale und Regulierungen ein nachhaltiger Konsum angeregt. Fleisch ist zum Beispiel im Vergleich zu 2020 wesentlich teuer und steht selten auf Speiseplänen öffentlicher Kantinen. Staatlicher Konsum und die Einkäufe von Unternehmen erfolgen auch nach strikten Nachhaltigkeitskriterien.

Mix-Szenario

Im Mix-Szenario wird Circular Economy sowohl produktionsseitig als auch konsumseitig umgesetzt. Die Politik fördert einerseits gezielt Innovationen, um das technische Potenzial von Produktionsprozessen auszureizen. Andererseits werden auch politische Instrumente eingesetzt, um das Konsumverhalten in nachhaltigere Bahnen zu lenken. Die technologische Entwicklung schreitet rasch voran, wird aber im Vergleich zum Technologie-Szenario ein wenig durch die wachstumsdämpfenden Effekte des geänderten Konsumverhaltens abgeschwächt. Der Konsum ist durch politische Lenkung und geänderte Lebensstile nachhaltiger geworden und stärker auf Suffizienz ausgerichtet.

Das Mix-Szenario stellt zu einem gewissen Grad eine Kombination aus dem Technologie-Szenario und dem Verhalten-Szenario dar. Dementsprechend werden hier alle fünf Handlungsstrategien (siehe Abbildung 3-2, Kapitel 3.1) genutzt, um Circular Economy in Deutschland zu etablieren, wobei es zu beachten gilt, dass es natürlich partiell zu Zielkonflikten zwischen diesen Strategien kommen kann und deswegen nicht alle zu 100 % umgesetzt werden können.

Diese Zielkonflikte zeigen sich auch in den weiteren Rahmenbedingungen. Ungezügelter technischer Fortschritt kann teilweise in Konflikt mit auf Suffizienz ausgerichteten Lebensstilen stehen. Politische Maßnahmen zur Einschränkung nicht nachhaltigen Konsums kann die Innovationsfähigkeit von Unternehmen beeinflussen. Nichtsdestotrotz wird im Mix-Szenario so weit als möglich von raschen technologischen Weiterentwicklungen, effizient gestalteten Produktionsprozessen und nachhaltigen Konsummustern ausgegangen. Es wird das Bild von einer Zukunft gezeichnet, in dem technischen Fortschritt und nachhaltiger Lebenswandel Hand in Hand gehen.

Produktionsseitige Ambitionen der Politik: Die Politik hat in den letzten 25 Jahren technische Innovationen stark durch monetäre und informative Politikinstrumente gefördert. Das Ziel hierbei war es, die vorhandenen technischen Potenziale in der Produktion auszuschöpfen und auch neue Potenziale zu erschließen. Zusätzlich werden auch Mindeststandards für die Nachhaltigkeit von Produkten von der Politik vorgegeben und die Verantwortung für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen wird nicht nur den Unternehmen allein überlassen.

Konsumseitige Ambitionen der Politik: Nachhaltiger Konsum wird auch in diesem Szenario stark über Ordnungsrecht und Fiskalpolitik gefördert. Fiskalische Instrumente werden genutzt, um externalisierte Kosten von Produkten zu Internalisieren. Ordnungsrecht setzt Standards und auch Verbote für Produktgruppen. Gleichzeitig fördert die Politik stark die Entwicklung von langlebigen Modellen und neue Formen von Product-as-a-Service-Ansätzen. Der Staat greift in einem vergleichsweisen hohen Maße in das Konsumverhalten ein, um dieses Nachhaltige zu gestalten. Staatlicher „Konsum“ (öffentliche Beschaffung etc.) erfolgt nach strikten Nachhaltigkeitskriterien.

Technologischer Fortschritt: Der allgemeine technologische Fortschritt ist ein wenig langsamer als im Technologie-Szenario, aber immer noch rasch und eventuell ein auch zielgerichteter für die Etablierung von Circular Economy in Deutschland. Zusätzlich nimmt auch hier Digitalisierung eine zentrale Rolle im wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Leben ein. Technologische Innovationen in den Bereichen Biotechnologie, Informationstechnologie, Energie, Mobilität und Materialwissenschaften, die 2020 noch in den Kinderschuhen steckten, haben sich bereits etabliert.

Konsumveralten: Auch im Mix-Szenario hat sich das Konsumverhalten der Bürger*innen in Deutschland sowie anderer Akteure (Unternehmen, Staat etc.) in den letzten 25 Jahren stark gewandelt. In der Bevölkerung dominieren zusehends auf Suffizienz ausgerichtete Lebensstile. Zusätzlich wird auch durch Preissignale und Regulierungen ein nachhaltiger Konsum angeregt. Staatlicher Konsum und die Einkäufe von Unternehmen erfolgen auch nach strikten Nachhaltigkeitskriterien.

7.4 Rahmenbedingungen gemäß Projektionsbericht

Tabelle 7-50: Ausgewählte Indikatoren aus dem Projektionsbericht 2021

Indikator	Einheit	2018	2025	2035	2040
Energetische Indikatoren					
Primärenergieverbrauch	PJ	12.989	11.627	9.802	9.021
Bruttostromverbrauch	TWh	595	579	632	673
Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch		37,8 %	51,2 %	77,6 %	83,9 %
Installierte Leistung Wind an Land	GW	52,3	62,8	92	107,2
Installierte Leistung Wind auf See	GW	6,4	10,5	32,2	39,8
Installierte Leistung PV	GW	45,2	75,5	118,2	122,4
Weitere Indikatoren					
Anzahl E-Pkw	Mio.	0,2	3,9	13,4	17,8
Elektrische Fahrleistung Lkw		0 %	5 %	19 %	29 %
Verkehrsnachfrage Pkw	Mrd. Pkm	895	906	899	914
Güterverkehrsleistung Straße	Mrd. tkm	499	526	557	574
Zubau Wärmepumpen	Mio.	-	0,36	1,73	2,93
Änderung Endenergieverbrauch Gebäudesektor zu 2018 durch:					
Gebäudesanierung	TWh	-	-16,7	-35,6	-42,0
Austausch des Wärmeversorgungssystems	TWh	-	-19,3	-81,7	-124,7
Steigende Außentemperatur	TWh	-	-5,8	-38,7	-52,8
Rahmendaten					
Bevölkerung (Annahme)	Mio.	-	83,6	83,8	83,5
CO_2-Zertifikatspreis	€^{2016}/EUA	-	25,0	40	53
CO_2-Zertifikatspreis (Sensitivität Energiewirtschaft)	€^{2016}/EUA	-	49,9	71,3	82,0
BEHG-Preis	€/t (nominal	-	55	200	275
Bruttoinlandsprodukt	Mrd. €^{2016}	-	3.400	3.700	3.900
Neue Treib- und Brennstoffe					
Wasserstoffnachfrage	PJ	-	8	48	67
Inländische Wasserstoffproduktion	PJ	-	8	49	67
Elektrische Leistung Elektrolyseure	GW	-	2,9	7,5	10,0
Inländischer Stromverbrauch der Elektrolyseure	PJ	-	11	69	96
Nachfrage strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe	PJ	-	-	70	71
Inländische Produktion strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe	PJ	-	-	8	9
Import strombasierte synthetische Flüssigkraftstoffe	PJ	-	-	62	63

Quelle: Projektionsbericht 2021, Seite 27f (Repenning et al. 2021) basierend auf (UBA - Umweltbundesamt 2020b; 2020a), (AGEB 2008-2020a; 2008-2020b), (BMWi 2021), (destatis 2019), (EC 2020a), Modellrechnungen von Fraunhofer ISI, IREES und Öko-Institut.

7.5 Endbericht der Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) „Schätzung ambitionierter Vermeidungspotenziale bei Verpackungen in Deutschland“

Angefertigt im Auftrag des Öko-Institut e.V. im Dezember 2022 im Rahmen der Studie „Modell Deutschland Circular Economy“

- Zu finden auf den folgenden Seiten -

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

Schätzung ambitionierter Vermeidungspotenziale bei Verpackungen in Deutschland

Endbericht

im Auftrag von:
Öko Institut e.V.

Mainz, Dezember 2022

Inhalt

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Hintergrund und Zielsetzung der Studie
2. Gegenstand der Studie
3. Annahmen
4. Ergebnisübersicht
5. Fazit
6. Quellenverzeichnis

Hintergrund und Zielsetzung der Studie

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Das Öko-Institut nimmt an einem Konsortial-Projekt teil (im Folgenden: Konsortial-Studie), das verschiedene **ökologische Optimierungspotenziale** beschreibt und Möglichkeiten erarbeitet, diese zu erschließen.

2. Ein Teilprojekt untersucht **Optimierungspotenziale bei Verpackungen**.

3. Vor diesem Hintergrund ist es die Zielsetzung des Projektes, **ambitionierte Vermeidungs- bzw. Einsparpotenziale** bei Verpackungen abzuleiten.

> Die in dieser Studie ausgewiesenen Vermeidungs- bzw. Einsparpotenziale haben den Charakter einer qualifizierten Schätzung.

Inhalt

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Hintergrund und Zielsetzung der Studie

2. **Gegenstand der Studie**

3. Annahmen

4. Ergebnisübersicht

5. Fazit

6. Quellenverzeichnis

Bezugsjahr und Parameter

1. Das Zielbezugsjahr ist **2020**.

2. Die Bezugsgröße ist der **Verpackungsverbrauch in Deutschland**.

3. Die Ergebnisse erstrecken sich **nicht nur** auf den **haushaltsnahen Verbrauch**, sondern gerade auch auf den **gewerblichen Verbrauch**. Zum gewerblichen Verbrauch zählen
   - **Verkaufsverpackungen** Industrie und Großgewerbe
   - **Transportverpackungen**

Übersicht Vermeidungspotenziale

Nr.	Vermeidungspotenzial
(a)	durch Reduktion von Produktabfällen
(b)	durch Verzicht auf ausgewählte Produkte
(c)	durch unverpackte Distribution
(d)	durch Vermeidung von Umverpackungen
(e)	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen
(f)	durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen
(g)	durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder andere wiederverwendbare Behälter
(h)	durch Nachfüllbeutel
(i)	durch sonstigen Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen
(j)	durch Veränderung der Produkt-Darreichung
(k)	durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten
(l)	durch Reduktion von Verpackungsfunktionen

> Die Vermeidungspotenziale werden in 12 Kategorien differenziert.

Inhalt

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Hintergrund und Zielsetzung der Studie
2. Gegenstand der Studie
3. **Annahmen**
4. Ergebnisübersicht
5. Fazit
6. Quellenverzeichnis

Annahmen

Auslegung „ambitionierte“ Einsparpotenziale

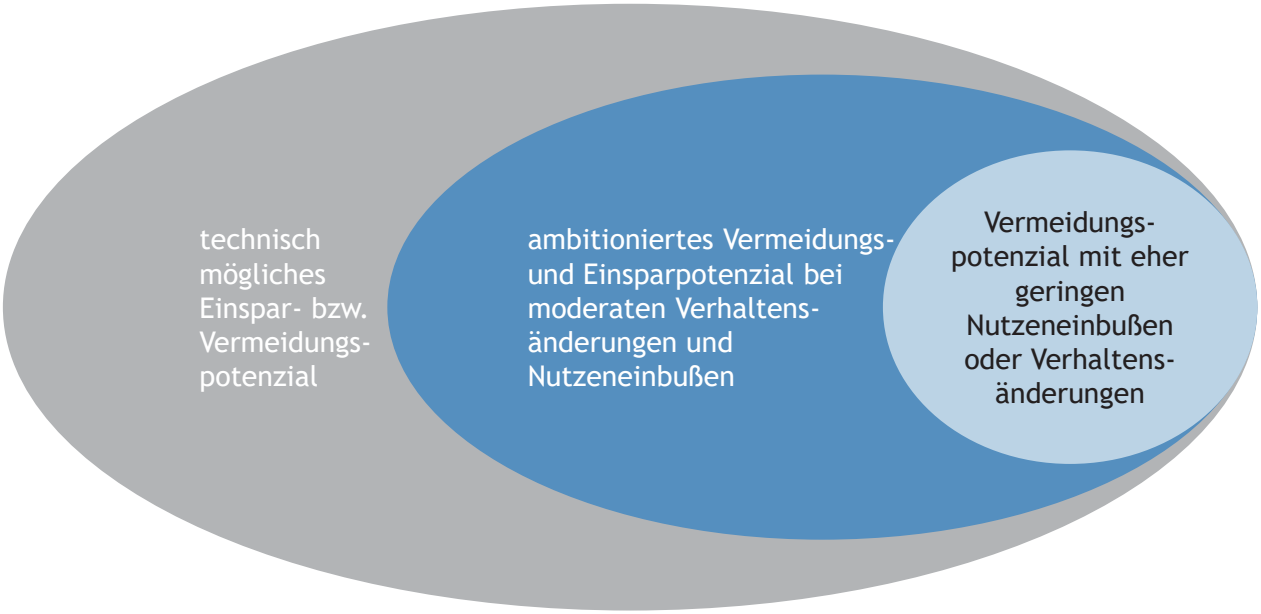
Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Die Einsparpotenziale werden unter den folgenden **Prämissen** ermittelt:

- Graduelle Nutzeneinbußen beim Endverbraucher können in Kauf genommen werden.
- Graduelle Verhaltensänderungen bei Abfüllern, Handel und Endverbrauchern dürfen vorausgesetzt werden.
- Die Erhöhung von Kosten und Produktpreisen darf in Kauf genommen werden, sofern nicht prohibitiv bzw. stark prohibitiv.
- Der Zeithorizont für notwendige Umstellungen darf mehr als zehn Jahre betragen.

2. Es sollen jedoch keine „Mondszenarien“ gerechnet werden, z.B. müssen die Umstellungen mit den heute **vorliegenden technischen Möglichkeiten realisierbar** sein.
3. Es darf offen bleiben, woher die Impulse bzw. Maßnahmen kommen, die auf eine Verhaltensveränderung bzw. sonstige Änderungen hinwirken

Ambitionierte Vermeidungs- und Einsparpotenziale



> Die technisch möglichen Einspar- und Vermeidungspotenziale gehen über die hier berücksichtigten ambitionierten Vermeidungs- und Einsparpotenziale hinaus.

Beispielhafte Darstellungen

> Im folgenden Kapitel wird für alle Kategorien **beispielhaft** dargestellt, welche Einsparungen bzw. Vermeidungen möglich sind.

> Dabei haben sich die Auftragnehmer vor allem auf Beispiele konzentriert, die in anderen Forschungsprojekten oder Auftragsstudien der Industrie bearbeitet wurden.

> Die **Berechnung der Einsparungen** wurde **nicht ausschließlich** anhand der Beispiele vorgenommen.

Quellen

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

> Die folgenden Quellen wurden genutzt:

- Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamts, BMBFs und anderer Institutionen
- Auftragsstudien im Auftrag der Industrie (zum Teil nicht veröffentlicht)
- Auftragsstudien im Auftrag von Umwelt- und Verbraucherverbänden
- Hintergrundinformationen und -berechnungen aus Forschungsvorhaben und Auftragsstudien
- Eigene Berechnungen auf der Basis der GVM-Datenbank „Marktmenge Verpackungen“
- Vorträge und sonstige Literaturquellen

Annahmen

(a) Reduktion von Produktabfällen

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. In Deutschland wurden 2020 6,5 Mio. Tonnen Lebensmittel in privaten Haushalten weggeschmissen (BMEL 2022).
2. Produktabfälle treten insbesondere bei **frischen Lebensmitteln** auf. Gründe für Produktabfälle sind unter anderem:
   - Das Mindesthaltbarkeitsdatum ist **abgelaufen**.
   - Das Produkt wird über **mehrere Tage offen** im Kühlschrank gelagert.
   - Das Produkt ist **verdorben**.
   - Das Produkt **mutet nicht mehr frisch an**.
3. Es wird angenommen, dass die Verpackungen der entsorgten Produkte vermieden werden können.
4. Die Einsparpotenziale ergeben sich insbesondere in den folgenden **Produktgruppen**:
   - Obst und Gemüse
   - Molkereiprodukte
   - Fisch- und Fleischwaren
   - Sonstige gekühlte Lebensmittel

(a) Reduktion von Produktabfällen

5. Die Einsparpotenziale sind bei **Lebensmitteln** besonders hoch.

6. Der **haushaltsnah** anfallende Verpackungsverbrauch für Lebensmittel kann durch die Reduktion von Produktabfällen um **8,0 %** gesenkt werden.

7. Im privaten Endverbrauch für **Non-Food-Produkte** (minus 1 %) und im **nicht-privaten Endverbrauch** (minus 3 %) sind die Einsparpotenziale **geringer**.

8. Bezogen auf den **gesamten Verpackungsverbrauch** können **4,0 %** der Verpackungen eingespart werden.

Quellen: BMEL (2022), GVM (2007), EHI (2021), Thünen-Institut (2022)

(b) Verzicht auf bestimmte Produkte

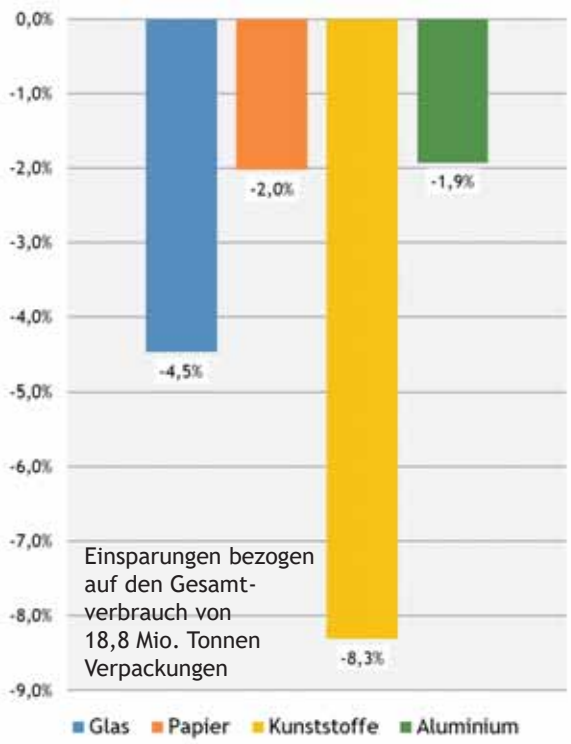
1. Es wird angenommen, dass **auf den Verbrauch bestimmter Produkte weitgehend verzichtet** wird.
2. Ob auf ein Produkt verzichtet werden kann, hängt davon ab, wie einschneidend die Nutzeneinbußen durch den Verzicht sind.
3. Die Verpackungen für diese Produkte können folglich eingespart werden. Zum Teil werden die eingesparten Verpackungen **durch andere Verpackungen ersetzt** (siehe Beispiele).
4. Beispiele für Produkte, auf die mit einem geringen Nutzeneinbußen verzichtet werden kann, sind:
   - Wasser in Einweg- und Mehrwegflaschen → Leitungswasser
   - Portioniertes Frischobst → nicht-portioniertes frisches Obst
   - Weichspüler → -
   - Feuchtes Toilettenpapier → herkömmliches Toilettenpapier
   - Feuerwerk für den Privatverbrauch → -
   - besondere Genussmittel wie Einweg-E-Zigaretten → -
   - Einweg-Tragetaschen → wiederverwendbare Tragetaschen, Rucksäcke, sonstige Taschen

(b) Verzicht auf bestimmte Produkte

5. Das größte Vermeidungspotenzial besteht in der Substitution von abgefüllten Wässern durch Leitungswasser.

6. Über alle Materialien können durch den Verzicht auf die zuvor genannten Produkte **3,1 % des Verpackungsverbrauchs vermieden** werden.

7. Das Vermeidungspotenzial ist mit 0,3 Mio. Tonnen bei **Kunststoffverpackungen** am größten (minus 8,3 %).



Quellen: GVM (2022c)

(c) unverpackte Distribution

1. In dieser Kategorie werden Produkte berücksichtigt, die
   a) bereits heute **zum Teil unverpackt vertrieben** werden oder
   b) heute nur verpackt angeboten werden, deren **Verpackung** aber **nicht notwendig** ist.
2. Es wird angenommen, dass der **Anteil unverpackt distribuierter Produkte steigt**. Die Verpackungen für die Produkte werden jedoch nicht vollständig als Vermeidungspotenzial berücksichtigt.
3. Die Auftragnehmer nehmen an, dass insbesondere die folgenden Produkte unverpackt distribuiert werden können:
   - **Obst und Gemüse** → Verzicht auf die Verpackungen, unverpackter Transport oder Einsatz von wiederverwendbaren Obst- und Gemüsenetzen
   - **Trockene Lebensmittel** (Teigwaren, Reis, Hülsenfrüchte, Müsli, Cerealien etc.) → steigender Anteil unverpackt distribuierter Lebensmittel. Die Lebensmittel werden in von den Kunden mitgebrachte Behälter umgefüllt
   - Bücher, CDs, Videospiele etc. → Verzicht auf Kunststofffolie
   - Haushalts- und Spielwaren → Verzicht auf Skinverpackung oder Hängekarten
   - Feuerzeuge → Verzicht auf Blister
4. In diese Kategorie zählt auch der **Verzicht auf Versandverpackungen**, sofern die Produkte auch in der Verkaufsverpackung versendet werden können.

Quellen: GVM (2020), Ökopol, GVM et al. (2020/2021), iöW (2020)

(c) unverpackte Distribution

5. Für den Versand in der Produktverpackung wurde differenziert nach den verschiedenen Inhalten bewertet, ob und welcher Anteil der Versandverpackungen entbehrlich ist. Hierzu zwei Beispiele:
   - Für einen Teil der **Möbel**, Sport- und **Freizeitartikel** oder den **Heimtierbedarf** kann auf **zusätzliche Versandverpackungen verzichtet** werden.
   - Keine oder nur **geringe Vermeidungspotenziale** bestehen für **elektronische Geräte**, **Schmuck** oder **Bekleidung**.

6. Zur Vermeidung von Produktabfällen wird angenommen, dass ein Teil der Frischobst- und Frischgemüseverpackungen weiterhin eingesetzt werden, um einen Anstieg der **Lebensmittelverluste** zu **verhindern**.

7. In Deutschland wurden 2020 2,4 Mrd. **Hemdchenbeutel** im SB-Bereich eingesetzt. Die Auftragnehmer sehen hier ein vollständiges Vermeidungspotenzial durch den Einsatz wiederverwendbarer Obstbeutel oder die unverpackte Distribution.

> Durch die unverpackte Distribution kann der Verpackungsverbrauch um 195 kt verringert werden.

(d) Vermeidung von Umverpackungen

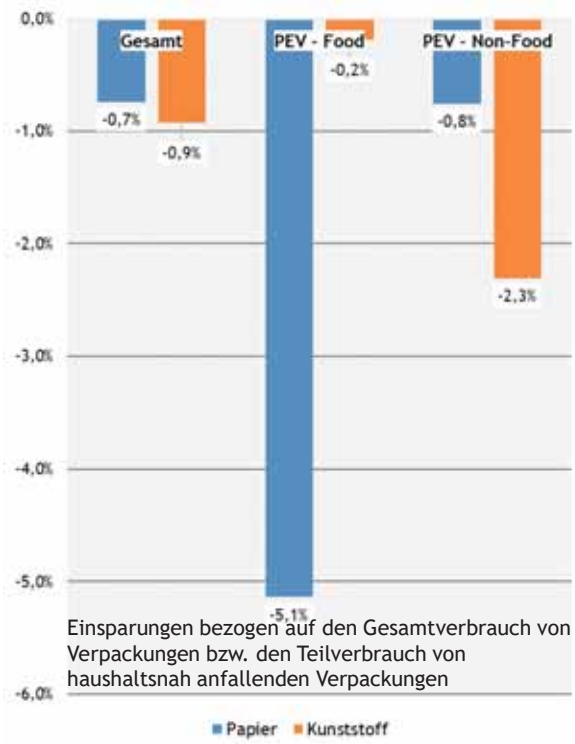
1. Umverpackungen werden zusätzlich zur Primärverpackung eingesetzt.
2. Die Auftragnehmer gehen davon aus, dass die **Umverpackungen vollständig eingespart** werden können. Mit dem Verzicht auf Umverpackungen gehen zum Teil Veränderungen der Primärverpackungen einher, z.B.
   - größere Etiketten, da nicht alle relevanten Informationen auf der Primärverpackung enthalten sind.
   - höhere Einsatzgewichte der Primärverpackungen, wenn die Umverpackung dem Stauchschutz dient.
3. Neben **1:1-Umverpackungen**, d.h. Umverpackungen für eine Verpackungseinheit, werden auch **Umverpackungen mit Bündelungsfunktion** berücksichtigt.
4. Beispielsweise können die folgenden Umverpackungen vermieden werden:
   - Faltschachteln für Kosmetik
   - Faltschachteln für Müsli und Cerealien
   - Kunststofffolie um Tee in Faltschachteln
   - Multiträger aus Karton oder Kunststoff für Getränke
5. Umverpackungen für Arzneimittel werden an dieser Stelle nicht als Vermeidungspotenzial berücksichtigt. Hier ist der Packungszusammenhang z.B. zwischen Faltschachtel, Flasche und Packungsbeilage rechtlich zwingend vorgeschrieben.

(d) Vermeidung von Umverpackungen

6. Das Vermeidungspotenzial liegt insbesondere bei **PPK-** und **Kst-Umverpackungen**.

7. Durch die Vermeidung der Umverpackungen können **60 kt PPK**-Verpackungen und **30 kt Kunststoff-verpackungen** eingespart werden.

8. Die Einsparpotenziale sind zwar vergleichsweise gering. Die Verpackungen können aber jederzeit und ohne einschneidende Nutzenverlust vermieden werden.



Einsparungen bezogen auf den Gesamtverbrauch von Verpackungen bzw. den Teilverbrauch von haushaltsnah anfallenden Verpackungen

Quellen: GVM, ifeu (2021)

(e) Reduktion überdimensionierter Verpackungen

1. Als **überdimensionierte Verpackungen** definieren wir Verpackungen, die unterfüllt sind bzw. einen überhöhten Kopfraum haben.
2. Das bedeutet, dass die Verpackung einen größeren Leerraum hat oder mit mehr Luft/Gas aufgefüllt wird als notwendig.
3. Neben Verpackungen, die mutwillig überdimensioniert entwickelt werden, berücksichtigen wir in dieser Kategorie auch Verpackungen, die überdimensioniert sind, weil Verpackungsmaschinen nur Verpackungen in gewissen Formen oder Größen bedienen können oder aus ökonomischen Gründen nur standardisierte Verpackungsgrößen eingesetzt werden.
4. Für Teilmärkte hat die GVM die Einsparpotenziale bereits im Auftrag des vzbv Verbraucherzentrale Bundesverbands ermittelt.
5. Es wird angenommen, dass der **überdimensionierte Teil der Verpackungen eingespart werden kann**. Hierzu ein Beispiel: Kosmetikdosen haben ein Einsparpotenzial von bis zu 27 %. Bezogen auf den gesamten Verbrauch von Kunststoffdosen und -tiegeln beträgt das Einsparpotenzial 0,4 kt.
6. Überdimensionierte Versandverpackungen und der nicht-private Endverbrauch wurden in der Studie für den vzbv nicht berücksichtigt. Die Einsparpotenziale in diesen Bereichen wurden für die vorliegende Studie überschlägig berechnet.

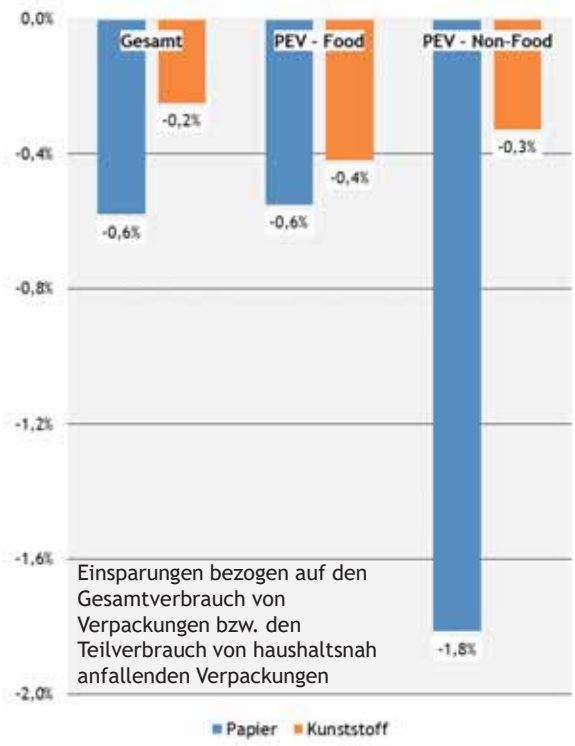
(e) Reduktion überdimensionierter Verpackungen

7. Insbesondere PPK- und Kunststoffverpackungen sind zum Teil überdimensioniert.

8. Der Verbrauch von PPK- und Kunststoffverpackungen kann durch die Reduktion überdimensionierter Verpackungen um **0,6 %** (minus 47 kt) bzw. **0,2 %** (minus 8 kt) **gesenkt** werden.

9. Das Aufkommen überdimensionierter Verpackungen ist **langfristig gesunken**. Gründe dafür sind unter anderem:
   - erhöhte Aufmerksamkeit für den Ressourcenschutz
   - optimierte Abfüllprozesse
   - Ankreiden seitens der Verbraucherzentralen und Verbraucher

Quellen: GVM, ifeu (2021)



(f) sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen

1. Zum Teil werden Verpackungen eingesetzt, die **keine elementare Verpackungsfunktion** erfüllen.
2. Diese Verpackungen können ohne substanziellen Nutzenverlust eingespart werden.
3. Zu dieser Kategorie zählen die Auftragnehmer beispielsweise:
   - einzeln verpackte Süßwaren
   - einzeln verpackte Teebeutel
   - Kunststoffbeutel um Wurstwaren, die im Darm angeboten werden (z.B. Teewurst)
4. In dieser Kategorie werden außerdem **überdimensionierte Verpackungen** berücksichtigt, die hauptsächlich dem **Diebstahlschutz** dienen. Dabei wird angenommen, dass der Diebstahlschutz durch andere Vorkehrungen erfüllt wird.
5. Beispiele sind Verpackungen für
   - Batterien,
   - USB-Sticks oder
   - SD-Karten.

(f) sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen

6. Es wird angenommen, dass die funktionslosen Verpackungen
   - **vollständig vermieden** werden können (z.B. Teebriefchen)
   - durch **optimierte Verpackungen** ersetzt werden (z.B. SD-Karten, USB-Sticks).

7. Die aufgezählten **Beispiele** sind **nicht abschließend**. Die Berechnung der Einsparpotenziale erfolgte nicht ausschließlich anhand der aufgezählten Beispiele.

Beispiel	Annahme
einzeln verpackte Teebeutel	Verzicht auf Einzelverpackungen
einzeln verpackte Süßwaren	Verzicht auf Einzelverpackungen
Einschläge für Schokolade	Verzicht auf Einschläge
Getränkeflaschen	Verzicht auf Sleeves für Getränkeflaschen
Batterien	Verkleinerung der Verpackung
SD-Karten	Verkleinerung der Verpackung

Quellen: GVM (1998), GVM, ifeu (2021)

(g) Umstellung auf wiederverwendbare Behälter

1. Mehrwegverpackungen können grundsätzlich für alle Produkte eingesetzt werden.

2. Wir berücksichtigen jedoch nur Mehrwegsysteme, die bereits **etabliert sind**, **politisch gefördert** werden oder potenziell **große Abfallvermeidungspotenziale** aufweisen.

3. Unter anderem werden die folgenden Mehrwegsysteme berücksichtigt:
   - Getränke
   - Speisen für den Unterwegsverzehr
   - Molkereiprodukte
   - Mehrweg-Transportverpackungen

4. Bei vielen Mehrwegsystemen fallen dennoch Einwegbestandteile an, die bei jeder Füllung zu berücksichtigen sind.

5. Die Umlaufzahlen sind der entscheidende Faktor zur Bewertung der Abfallvermeidungspotenziale. Die **Umlaufzahlen** werden aus bestehenden Mehrwegsystemen abgeleitet.

(g) Umstellung auf wiederverwendbare Behälter

6. Es wird **nicht** angenommen, dass die genannten Mehrwegsysteme die Einwegsysteme vollständig ablösen. In den verschiedenen Produktfeldern erreichen die **Mehrwegsysteme hohe Anteile**, z.B. 70 % Mehrweganteil bei Getränken.

7. Bei der Berechnung der Vermeidungspotenziale wurde angenommen, dass überwiegend wenige **Poolsysteme** statt vieler Individualsysteme eingesetzt werden.

8. Neben der Umstellung auf Mehrwegverpackungen werden auch **wiederwendbare Behälter** berücksichtigt, die von den Endverbrauchern mitgebracht werden, aber keine Verpackung sind.

9. Beispiele sind „Mehrweg-Brotbeutel“ oder „Tupperdosen“ für Aufschnitt.

10. Die wiederverwendbaren Behälter ersetzen ausschließlich Serviceverpackungen im Handwerk und der Gastronomie, z.B.
    - Einschläge für Aufschnitt
    - Bäckerbeutel
    - Einweg-Becher für den Außer-Haus-Verzehr

(g) Umstellung auf wiederverwendbare Behälter

10. Die Umstellung auf Mehrwegverpackungen hat den **größten Effekt auf den Verpackungsverbrauch** (minus 13,5 %).

11. Der Rückgang ist im privaten Endverbrauch stärker als im nicht-privaten Endverbrauch. Das ist auch darauf zurückzuführen, dass **Mehrwegverpackungen** immer dem **gewerblichen Verbrauch zugeordnet** werden.

12. Der Verbrauch der PPK-Verpackungen sinkt insbesondere in Folge der **Substitution von PPK-Transportverpackungen**.

Produkt / Verpackungssegment *Beispiele*	Mehrwegquote	Bemerkung
Getränke (einschließlich Wein und Sekt*)	70%	sofern nicht bereits unter (b) berücksichtigt
Getränkebecher	70%	
Serviceverpackungen für Speisen	30%	
andere Konsumgüter	25%	
Versandverpackungen	50%	
Transportverpackungen für Obst und Gemüse	100%	
Transportverpackungen für Pflanzen	50%	
sonstige Transportverpackungen	30 % - 50 %	
Big Bags	25%	
Holzpaletten	100%	

Quellen: Fraunhofer CCPE (2022), GVM (2022b), GVM (2022c), GVM (2022d), Öko-Institut (2022), Ökopol, GVM et al. (2020/2021), Ökopol, GVM et al. (2022), SEA (2021)

* nach Überarbeitung der aktuell geltenden Norm für Sektflaschen

(h) Nachfüllbeutel

1. Nachfüllbeutel werden heute in einigen Produktfeldern eingesetzt, z.B. für
   - Wasch-, Putz- und Reinigungsmittel
   - Körperpflegeprodukte
   - Gewürze

2. Die Annahme ist, dass die Nachfüllbeutel einen **großen Teil der starren Verpackungen ersetzen**.

3. Darüber hinaus wurde berücksichtigt, dass die Nachfüllbeutel häufig eine **größere Füllgröße** haben als die Behälter.

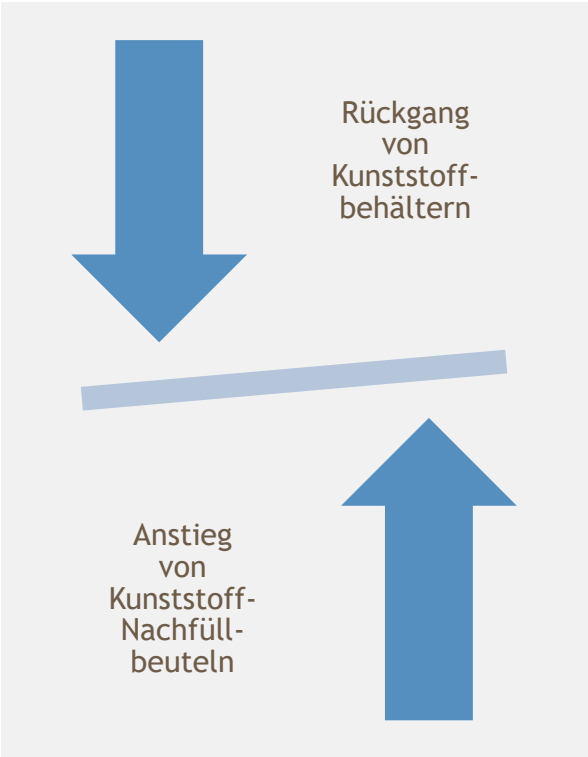
4. Hierzu ein **Beispiel**: Zwei Nachfüllbeutel für Seife ersetzen vier Dosierspender. Der Seifenspender wird nach mehrfachem Befüllen durch einen neuen Dosierspender ersetzt.

(h) Nachfüllbeutel

1. Das Potenzial für Nachfüllbeutel besteht hauptsächlich beim **haushaltsnah anfallenden Verpackungsverbrauch** (minus 1,4 %).

2. Der Rückgang bei **Kunststoff-verpackungen** ist vergleichsweise gering (**minus 0,4 %**), da die Kunststoffbeutel auch die Nicht-Kunststoffbehälter ersetzen.

3. Bezogen auf alle Verpackungs-materialien können durch den Einsatz von Nachfüllbeuteln **123 kt** Verpackungen eingespart werden (minus 0,7 %).



(i) Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen

1. In den vergangenen Jahren wurden **starre Verpackungen** bereits zum Teil durch **flexible Verpackungen** ersetzt. Ein Beispiel ist die Umstellung von Schalen auf **Beutel für Hackfleisch** oder die Umstellung von Konservengläsern bzw. -dosen auf **Kunststoff-Standbodenbeutel**.

2. Es wird angenommen,
   - dass der Anteil starrer Verpackungen in bisherigen Produktfeldern ausgebaut wird und
   - dass starre Verpackungen auch in weiteren Produktfeldern eingesetzt werden.

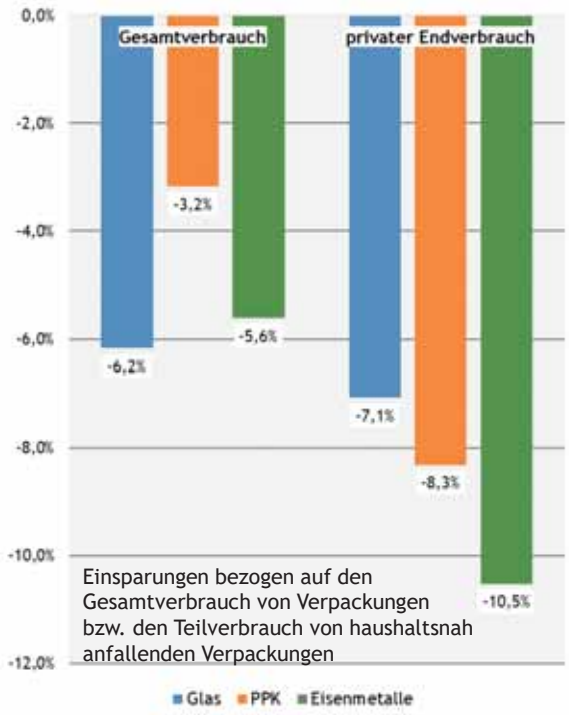
3. Folgende Produktfelder werden in dieser Kategorie berücksichtigt:
   - Konserven
   - Fleischwaren
   - Versandhandel (Umstellung von Kartonagen auf Kunststoff- und Kraftpapierbeutel)
   - Süßwaren und Knabberartikel
   - Eisenwaren
   - u.ä.

(i) Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen

> Im **privaten Endverbrauch** sind die Verbrauchsrückgänge durch die Umstellung auf flexible Verpackungen größer als im nicht-privaten Endverbrauch.

> Die Umstellung von **Glas-** und **Weißblechkonserven** auf Kunststoffbeutel reduziert den Verbrauch von Glas- und Weißblechverpackungen stark (**minus 6 %**).

> Die Umstellung auf flexible Kunststoffverpackungen zehrt den Verbrauchsrückgang starrer Kunststoffverpackungen auf.



Quellen: GVM (2022a), ifeu (2021)

(j) Veränderung der Produkt-Darreichung

1. Viele Produkte werden in unterschiedlichen Formen angeboten, z.B.
   - Käse, Aufschnitt: in Stücken, in Scheiben, gerieben
   - Waschmittel: als Pulver, als Flüssigkeit, als Pods
   - Grillanzünder: fest und flüssig
   - Kaffee: als Pulver, als Bohnen, als Kaffeepods oder -kapseln

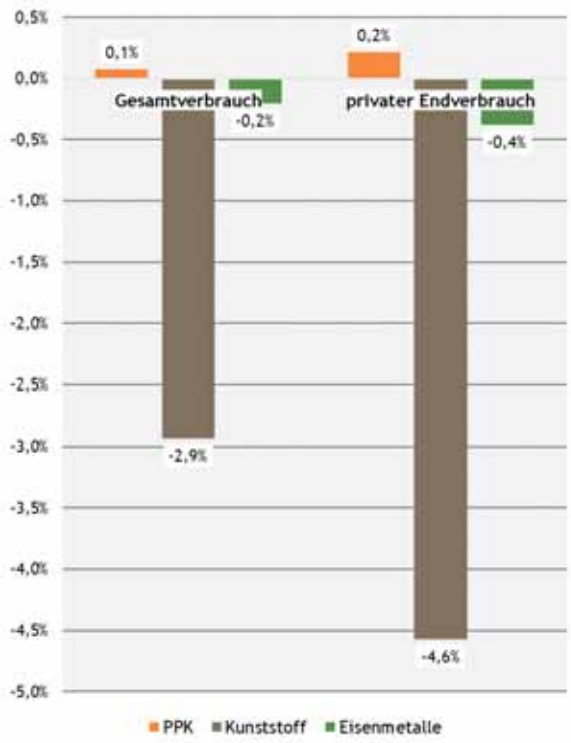
2. Die verschiedenen Darreichungsformen weisen unterschiedliche **Materialeffizienzen** (g Verpackung pro kg Füllgut) auf.

3. Es wird angenommen, dass die Produkte in der **Form mit der besten Materialeffizienz** angeboten werden.

4. Für die zuvor genannten Produkte bedeutet das zum Beispiel:
   1. Käse, Aufschnitt: wird überwiegend in Stücken angeboten
   2. Waschmittel: wird überwiegend als Pulver angeboten
   3. Grillanzünder: Es werden überwiegend feste Grillanzünder angeboten
   4. Kaffee: als Pulver oder als Bohnen statt Kaffeepods oder Kaffeekapseln

(j) Veränderung der Produkt-Darreichung

5. In dieser Kategorie ist auch ein Anstieg der **Thekenware** zu Lasten vorverpackter Ware berücksichtigt.
6. Durch die Veränderung der Darreichungsform kann das notwendige Verpackungsaufkommen um **bis zu 80 %** reduziert werden.
7. Der **PPK-Verbrauch steigt** in dieser Kategorie (+ 12 kt). Grund ist, dass zum Teil Kunststoffverpackungen für flüssige Produkte durch PPK-Verpackungen für trockene Produkte ersetzt werden (z.B. Waschmittel).
8. Der **Kunststoffverbrauch** sinkt durch die veränderte Darreichungsform um 34 kt.



Quellen: ecoplus et al. (2020)

(k) Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten

1. Die **Einsatzgewichte** der Verpackungen haben sich in den vergangenen Jahrzehnten **stark verringert**.

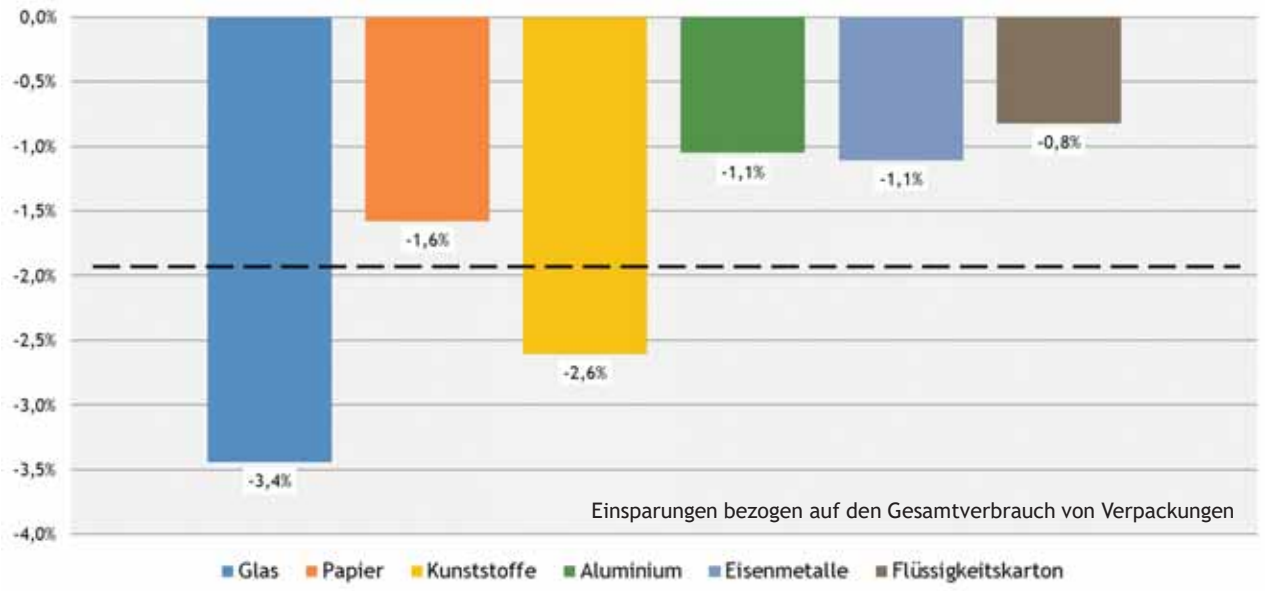
2. Der größte Teil der Optimierungspotenziale wurde bereits realisiert.

3. Die **weiteren möglichen Reduktionen** der Grammaturen unterscheiden sich je nach Material und Anwendung sehr stark.
   - Bei Glasverpackungen sind vergleichsweise große Gewichtsreduktionen möglich.
   - Bei Kunststoffverpackungen steigen die Einsatzgewichte zum Teil, um die Verpackungen recyclingfähig zu gestalten. Hier sind folglich Einsparpotenziale vorhanden.

4. Die Reduktionen der Grammaturen werden nur insofern berücksichtigt, als die Verpackungen nicht bereits in den Kategorien (a)-(j) vermieden oder ersetzt wurden.

Quellen: GVM (2022a)

(k) Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten



> Bei Glas- und Kunststoffverpackungen können die Einsatzgewichte am stärksten reduziert werden.
> Über alle Materialien können 1,9 % des Verpackungsverbrauchs durch die Reduktion der Verpackungsgewichte eingespart werden.

(I) Reduktion von Verpackungsfunktionen

1. Die zunehmenden Verpackungsfunktionen **erhöhen das Gewicht der Verpackungen**.

2. Werden Teile der **Verpackungsfunktion eingespart**, **verringern** sich auch die **Verpackungsgewichte**.

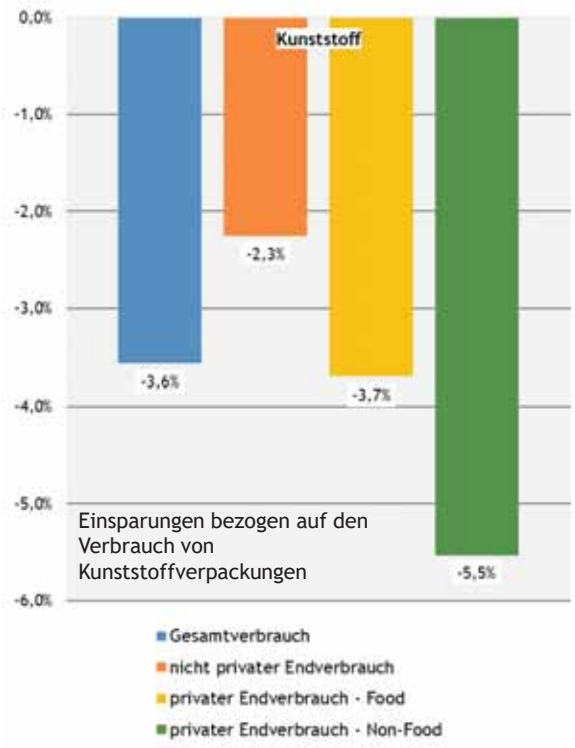
3. Wir nehmen an, dass insbesondere die folgenden Verpackungsfunktionen reduziert werden können, die zu geringen Nutzeneinbußen bei den Verbrauchern führen:
   - **Verzicht auf Verschlüsse** auf Getränkekartonverpackungen ≤ 500 ml
   - Verzicht auf Verschlüsse auf Getränkekartonverpackungen für pasteurisierte Füllgüter (alle Füllgrößen)
   - **Dosierfunktion** für Süßstoff
   - **Sprühpistolen** auf Putz- und Reinigungsmitteln
   - **Tragegriffe**
   - Verringerung der Anzahl der **Umwicklungen** von **Stretchfolien** oder Umstieg auf **Umreifungsbänder**

(I) Reduktion von Verpackungsfunktionen

4. In der Kategorie „Reduktion von Verpackungsfunktionen“ können hauptsächlich **Kunststoffverpackungen** eingespart werden.

5. Bei **Non-Food-Verpackungen** ist das Vermeidungspotenzial am größten (minus 5,5 %).

6. Über **alle Materialien** kann der Verpackungsverbrauch durch die Reduktion von Verpackungsfunktionen (sofern die Verpackungen nicht unter (a) bis (k) berücksichtigt sind) um **203 kt** gesenkt werden (minus 1 %).



Nicht berücksichtige Veränderungen

1. Es ist nicht das Ziel, **Verschiebungen zwischen Verpackungsmaterialien** vorzunehmen, um den Verpackungsverbrauch insgesamt möglichst stark zu reduzieren.

2. Das wäre beispielsweise möglich, wenn schwere Verpackungsmaterialien durch leichtere Verpackungsmaterialien ersetzt werden. Das wäre beispielsweise möglich für:
   - Mehrweg-PET-Flaschen statt Mehrweg-Glas-Flaschen
   - Weißblech-Konservendose statt Konservenglas
   - Kunststoff-Versandtasche statt Kraftpapier-Versandtasche

3. Verschiebungen zwischen Verpackungsmaterialien wurden nur insofern vorgenommen, als es durch die Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder flexible Verpackungen notwendig war.

Nicht berücksichtige Veränderungen

4. Zudem wurden **Füllgrößenoptimierungen** an dieser Stelle nicht berücksichtigt, z.B. eine Substitution der 0,33 l Getränkeflaschen durch 0,5 l Getränkeflaschen. Es ist davon auszugehen, das die Produktverluste bei optimierten, d.h. größeren, Füllgrößen ansteigen würden.

5. Mehrwegsysteme können zu einer starken Verringerung der Verpackungsaufkommens führen (Vgl. Abschnitt g). Bei den MW-Systemen wurden **keine Optimierungen im System**, z.B. steigende Umlaufzahlen, angenommen. Sehr wohl wurde aber berücksichtigt, dass sich die Umlaufzahlen bei steigenden Mehrweganteilen erhöhen.

6. Was den Verpackungsverbrauch angeht, haben zusätzliche Optimierungen in den Mehrwegsystemen vergleichsweise geringe Auswirkungen.

Inhalt

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Hintergrund und Zielsetzung der Studie
2. Gegenstand der Studie
3. Annahmen
4. **Ergebnisübersicht**
5. Fazit
6. Quellenverzeichnis

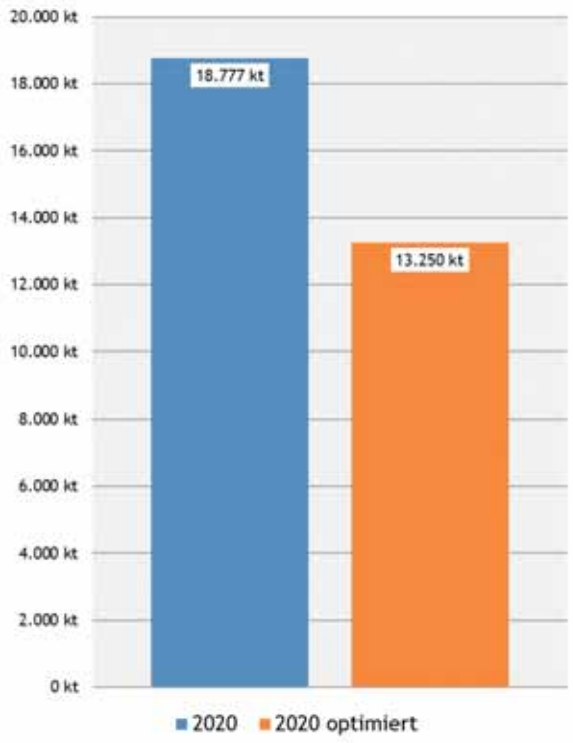
Ergebnisübersicht

Optimierter Verpackungsverbrauch

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

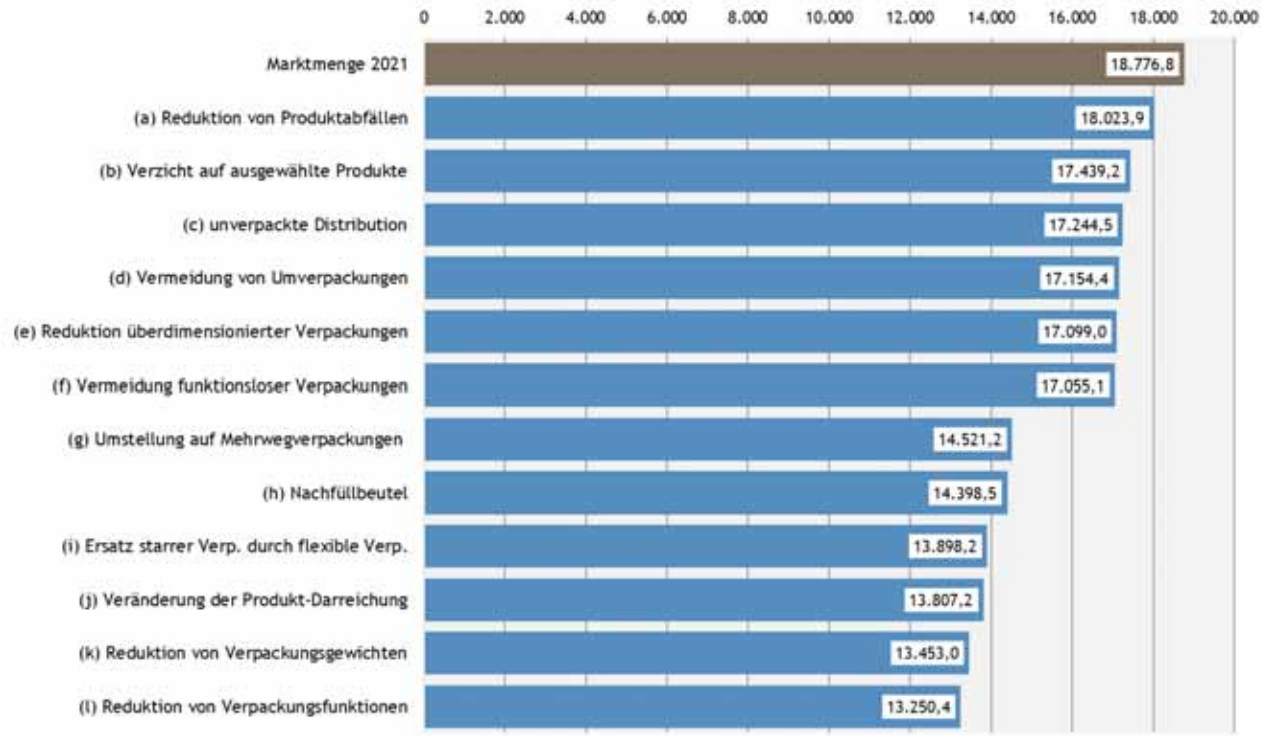
> Wenn die verschiedenen Optimierungs- und Vermeidungspotenziale realisiert werden, kann der **Verpackungsverbrauch um 5,5 Mio. Tonnen auf 13,3 Mio. Tonnen verringert** werden (minus 29,4 %).

> Was die verschiedenen Verpackungsmaterialien angeht, ist das **Vermeidungspotenzial bei PPK-Verpackungen** (minus 3,0 Mio. Tonnen) am größten.

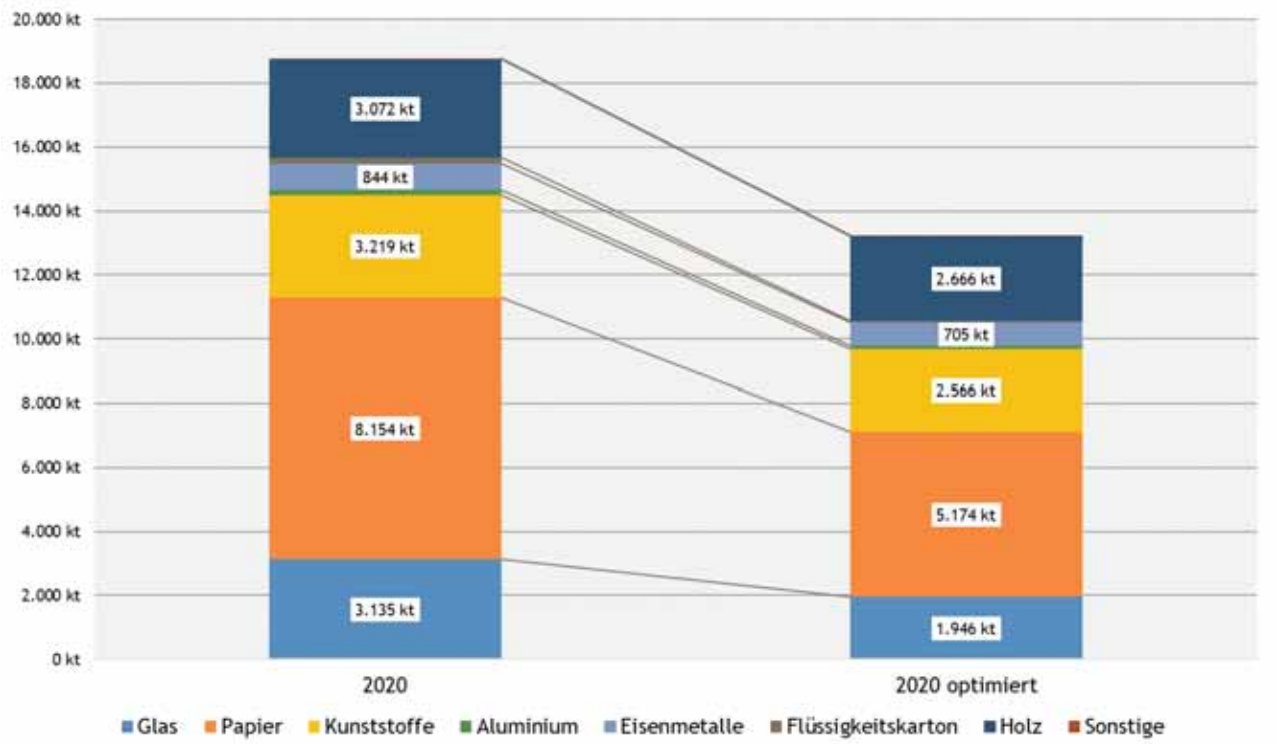


Material	Markt-menge in 2020	./. durch Reduktion von Produktabfällen (a)	./. durch Verzicht auf bestimmte Produkte (b)	./. durch unverpackte Distribution (c)	./. durch Vermeidung von Umverpackungen (d)	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen (e)	./. durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen (f)	./. durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder auf andere wiederverwendbare Behälter (g)	./. durch Nachfüllbeutel (h)	./. durch Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen (i)	./. durch Veränderung der Produkt-Darreichung (z.B. Stücke statt Scheiben) (j)	./. durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten (k)	./. durch Reduktion von Verpackungsfunktionen (l)	= Markt-menge optimiert 2020	Reduktionspotenzial insgesamt Summe (a) bis (l)
Glas	3.135,2	-186,2	-140,2	-0,1				-459,9	-101,7	-193,5		-107,9		1.945,8	-1.189,4
Papier	8.153,9	-264,0	-165,3	-138,5	-60,4	-47,3	-26,2	-1.812,0		-258,8	6,3	-129,0	-84,9	5.174,1	-2.979,8
Kunststoffe	3.219,0	-139,4	-267,5	-55,8	-29,7	-8,0	-15,6	170,7	-14,1	-0,6	-94,4	-83,8	-114,8	2.566,0	-653,0
Aluminium	139,9	-6,0	-2,7				-2,1	-14,1			-1,3	-1,5	-2,7	109,6	-30,3
Eisenmetalle	843,5	-27,2	-2,9					-43,5	-7,0	-47,3	-1,7	-9,3		704,6	-138,9
Flüssigkeitskarton	182,2	-17,9	-1,2					-105,5				-1,5		56,1	-126,1
Holz	3.072,0	-109,9	-5,0	-0,4				-269,8				-21,3		2.665,7	-406,3
Sonstige	31,1	-2,4											-0,1	28,6	-2,5
Summe	**18.776,8**	**-752,9**	**-584,7**	**-194,8**	**-90,1**	**-55,4**	**-43,9**	**-2.533,9**	**-122,7**	**-500,2**	**-91,0**	**-354,3**	**-202,5**	**13.250,4**	**-5.526,4**

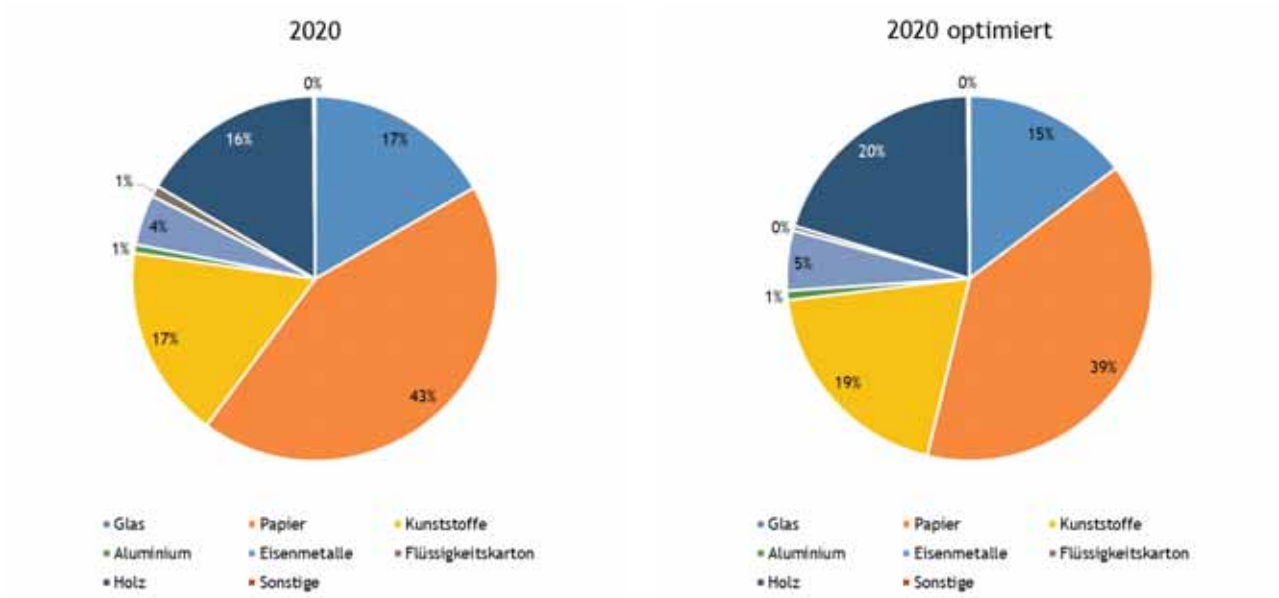
Privater Endverbrauch + nicht-privater Endverbrauch, alle Angaben in kt



Aufteilung nach Verpackungsmaterialien



Aufteilung nach Verpackungsmaterialien



> Der Anteil der Kunststoffverpackungen steigt im Optimierungsszenario. Das ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass Kunststoffverpackungen (1) als Mehrwegverpackungen eingesetzt werden und (2) als flexible Verpackungen Behälter aus anderen Materialien ersetzen.

Verpackungsstruktur

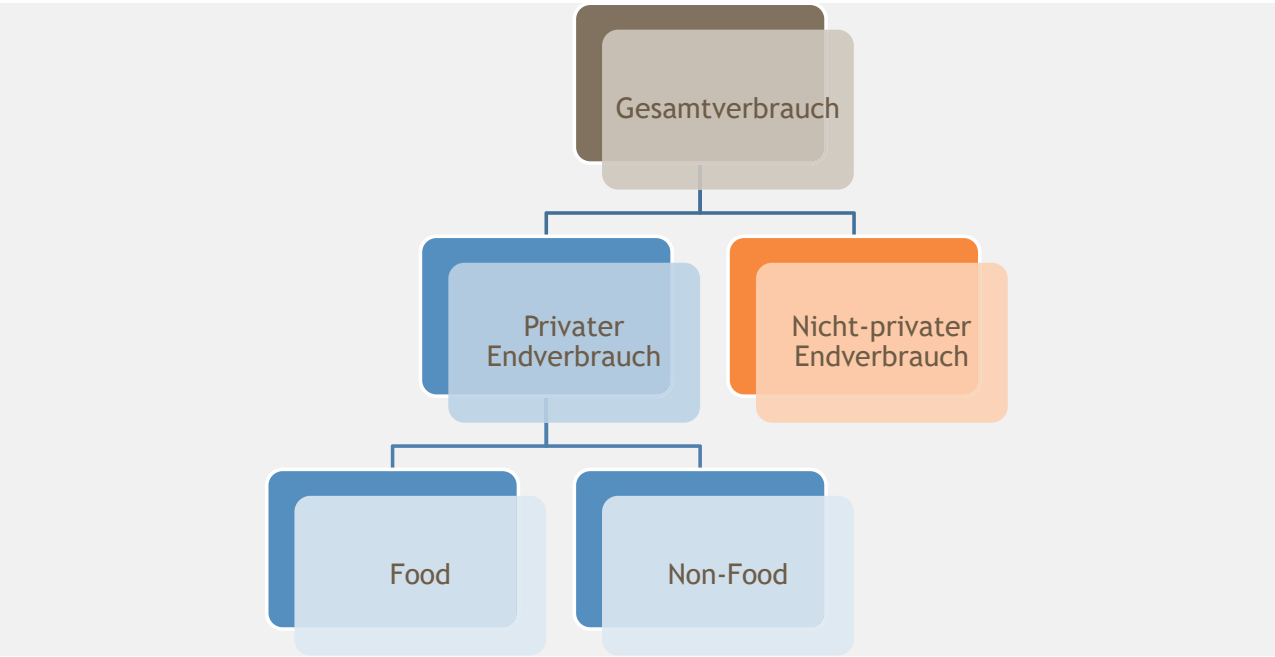
> Im Szenario mit dem optimierten Verpackungsverbrauch verändert sich die Verpackungsstruktur:

- Anstieg des Mehrweganteils
- Zunahme des Verbrauchs von flexiblen Verpackungen
- Abnahme des Verbrauchs von starren Einwegverpackungen
- Abnahme des Verbrauchs von Einweg-Serviceverpackungen
- Abnahme des Verbrauchs von Nebenbestandteilen (Verschlüsse, Einschläge, Sprühpistolen, …)

Ergebnisübersicht

Teilmärkte

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die folgenden **Teilmärkte** dargestellt:



Optimierung des Verpackungsverbrauchs - PEV

Material	Markt-menge in 2020	./. durch Reduktion von Produktabfällen (a)	./. durch Verzicht auf bestimmte Produkte (b)	./. durch unverpackte Distribution (c)	./. durch Vermeidung von Umverpackungen (d)	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen (e)	./. durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen (f)	./. durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder auf andere wiederverwendbare Behälter (g)	./. durch Nachfüllbeutel (h)	./. durch Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen (i)	./. durch Veränderung der Produkt-Darreichung (z.B. Stücke statt Scheiben) (j)	./. durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten (k)	./. durch Reduktion von Verpackungsfunktionen (l)	= Markt-menge optimiert 2020	Reduktionspotenzial insgesamt Summe (a) bis (l)
Glas	2.734,5	-186,2	-5,1	-0,1				-774,2	-101,7	-193,5		-80,6		1.393,2	-1.341,3
Papier	3.112,4	-106,5	-136,5	-127,3	-55,2	-47,3	-26,2	-430,0		-258,8	6,3	-49,1	-82,4	1.799,5	-1.312,9
Kunststoffe	2.065,4	-115,0	-250,6	-55,5	-18,3	-8,0	-15,6	-174,4	-11,3	-0,6	-94,4	-33,7	-88,8	1.199,1	-866,3
Aluminium	133,5	-5,8	-2,7				-2,1	-9,1			-1,3	-1,5	-2,7	108,4	-25,1
Eisenmetalle	450,1	-26,4	-2,9					-33,5	-5,7	-47,3	-1,7	-4,3		328,2	-121,9
Flüssigkeitskarton	182,2	-17,9	-1,2					-105,5				-1,5		56,1	-126,1
Holz	30,1	-0,2		-0,4								0,0		29,5	-0,6
Sonstige	17,6	-2,4												15,2	-2,4
Summe	**8.725,8**	**-460,4**	**-399,0**	**-183,3**	**-73,4**	**-55,4**	**-43,9**	**-1.526,5**	**-118,7**	**-500,2**	**-91,0**	**-170,8**	**-173,9**	**4.929,2**	**-3.796,6**

Privater Endverbrauch, alle Angaben in kt

Optimierung des Verpackungsverbrauchs – PEV (Food)

Material	Markt-menge in 2020	./. durch Reduktion von Produktabfällen (a)	./. durch Verzicht auf bestimmte Produkte (b)	./. durch unverpackte Distribution (c)	./. durch Vermeidung von Umverpackungen (d)	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen (e)	./. durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen (f)	./. durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder auf andere wiederverwendbare Behälter (g)	./. durch Nachfüllbeutel (h)	./. durch Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen (i)	./. durch Veränderung der Produkt-Darreichung (z.B. Stücke statt Scheiben) (j)	./. durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten (k)	./. durch Reduktion von Verpackungsfunktionen (l)	= Markt-menge optimiert 2020	Reduktionspotenzial insgesamt Summe (a) bis (l)
Glas	2.610,5	-180,7	-5,1	-0,1				-774,2	-35,6	-193,5		-78,2		1.343,2	-1.267,3
Papier	722,3	-97,0	-5,6	-56,2	-37,1	-4,0	-15,6	-51,5		-20,4	-6,5	-8,6	-19,6	400,4	-322,0
Kunststoffe	1.386,8	-103,1	-212,8	-52,9	-2,6	-5,8	-14,5	-166,6	-1,4	-0,3	-83,5	-18,6	-51,3	673,5	-713,3
Aluminium	110,5	-5,0	-1,7				-2,1	-7,1			-1,3	-1,2	-2,7	89,4	-21,1
Eisenmetalle	326,1	-25,4	-0,7					-32,5	-0,3	-47,3	-1,7	-2,7		215,5	-110,6
Flüssigkeitskarton	181,8	-17,9	-1,2					-105,5				-1,5		55,7	-126,0
Holz	26,8	-0,2		-0,4								0,0		26,2	-0,6
Sonstige	9,6	-2,3										0,0		7,3	-2,3
Summe	**5.374,4**	**-431,6**	**-227,0**	**-109,6**	**-39,7**	**-9,8**	**-32,2**	**-1.137,3**	**-37,2**	**-261,5**	**-92,9**	**-110,8**	**-73,6**	**2.811,2**	**-2.563,2**

Privater Endverbrauch (Food), alle Angaben in kt

Optimierung des Verpackungsverbrauchs – PEV (Non-Food)

Material	Markt-menge in 2020	./. durch Reduktion von Produktabfällen (a)	./. durch Verzicht auf bestimmte Produkte (b)	./. durch unverpackte Distribution (c)	./. durch Vermeidung von Umverpackungen (d)	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen (e)	./. durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen (f)	./. durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder auf andere wiederverwendbare Behälter (g)	./. durch Nachfüllbeutel (h)	./. durch Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen (i)	./. durch Veränderung der Produkt-Darreichung (z.B. Stücke statt Scheiben) (j)	./. durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten (k)	./. durch Reduktion von Verpackungsfunktionen (l)	= Markt-menge optimiert 2020	Reduktionspotenzial insgesamt Summe (a) bis (l)
Glas	124,0	-5,5	0,0					0,0	-66,1			-2,5		50,0	-74,0
Papier	2.390,1	-9,5	-131,0	-71,1	-18,1	-43,3	-10,7	-378,5		-238,4	12,8	-40,6	-62,7	1.399,1	-990,9
Kunststoffe	678,6	-11,9	-37,8	-2,6	-15,7	-2,2	-1,1	-7,8	-10,0	-0,3	-10,9	-15,2	-37,5	525,7	-153,0
Aluminium	23,0	-0,8	-1,0				0,0	-2,0				-0,2		19,0	-4,0
Eisenmetalle	124,0	-1,0	-2,3					-1,0	-5,4			-1,6		112,7	-11,3
Flüssigkeitskarton	0,4	0,0						0,0				0,0		0,4	0,0
Holz	3,3	0,0										0,0		3,3	0,0
Sonstige	8,0	-0,1										0,0		7,9	-0,1
Summe	**3.351,4**	**-28,8**	**-172,1**	**-73,7**	**-33,7**	**-45,6**	**-11,8**	**-389,2**	**-81,5**	**-238,7**	**1,9**	**-60,0**	**-100,3**	**2.118,0**	**-1.233,4**

Privater Endverbrauch (Non-Food), alle Angaben in kt

Optimierung des Verpackungsverbrauchs – NPEV

Material	Markt-menge in 2020	./. durch Reduktion von Produktabfällen (a)	./. durch Verzicht auf bestimmte Produkte (b)	./. durch unverpackte Distribution (c)	./. durch Vermeidung von Umverpackungen (d)	durch Reduktion überdimensionierter Verpackungen (e)	./. durch sonstige Vermeidung funktionsloser Verpackungen (f)	./. durch Umstellung auf Mehrwegverpackungen oder auf andere wiederverwendbare Behälter (g)	./. durch Nachfüllbeutel (h)	./. durch Ersatz starrer Verpackungen durch flexible Verpackungen (i)	./. durch Veränderung der Produkt-Darreichung (z.B. Stücke statt Scheiben) (j)	./. durch Reduktion von Grammaturen bzw. Verpackungsgewichten (k)	./. durch Reduktion von Verpackungsfunktionen (l)	= Markt-menge optimiert 2020	Reduktionspotenzial insgesamt Summe (a) bis (l)
Glas	400,7		-135,1					314,3				-27,3		552,6	151,9
Papier	5.041,5	-157,5	-28,7	-11,2	-5,2			-1.382,0				-79,9	-2,5	3.374,6	-1.666,9
Kunststoffe	1.153,6	-24,4	-16,9	-0,3	-11,5			345,1	-2,8			-50,1	-26,0	1.366,9	213,3
Aluminium	6,4	-0,2						-5,0				0,0		1,2	-5,2
Eisenmetalle	393,4	-0,8						-10,0	-1,3			-5,0		376,3	-17,1
Flüssigkeitskarton	0,0							0,0				0,0		0,0	0,0
Holz	3.041,9	-109,7	-5,0					-269,8				-21,3		2.636,2	-405,7
Sonstige	13,5											0,0	-0,1	13,4	-0,1
Summe	**10.051,0**	**-292,5**	**-185,7**	**-11,4**	**-16,6**	**0,0**	**0,0**	**-1.007,4**	**-4,0**	**0,0**	**0,0**	**-183,5**	**-28,6**	**8.321,2**	**-1.729,8**

Nicht-Privater Endverbrauch, alle Angaben in kt

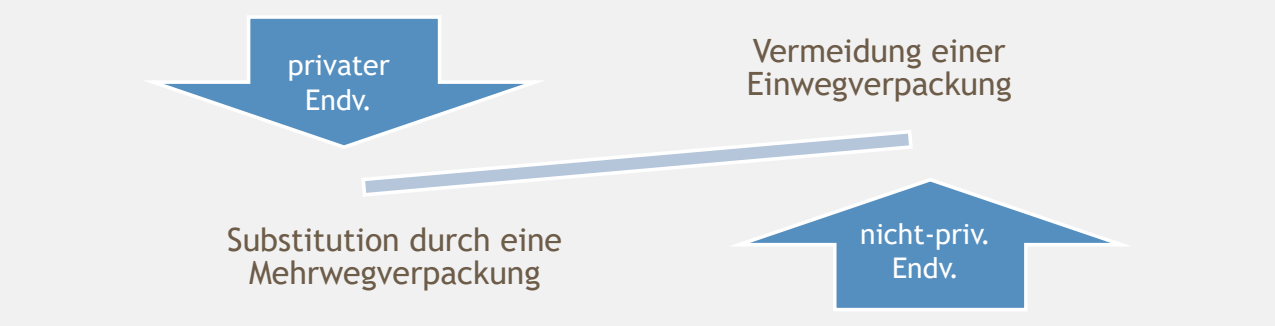
Erläuterungen zum nicht-privaten Endverbrauch

gvm Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

> Beim nicht-privaten Endverbrauch sind die Vermeidungspotenziale deutlich geringer als beim privaten Endverbrauch.

> Grund ist u.a., dass die **Mehrwegverpackungen dem nicht-privaten Endverbrauch zugeordnet** werden.

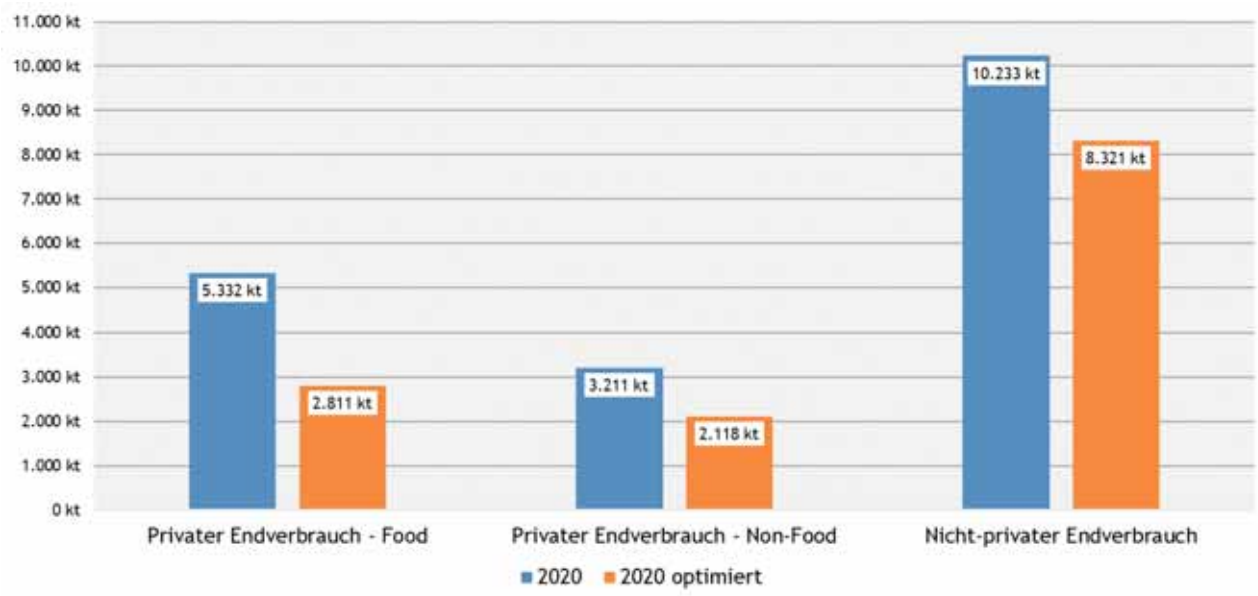
> Hierzu ein Beispiel: Die Substitution einer Einwegverpackung im privaten Endverbrauch durch eine Mehrwegverpackung führt zu einem sinkenden Verpackungsaufkommen im privaten Endverbrauch und einem steigenden Verpackungsaufkommen im nicht-privaten Endverbrauch.



Ergebnisübersicht

Optimierungspotenzial in den Teilmärkten

gvm Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung



> Das größte Optimierungspotenzial besteht für Lebensmittelverpackungen im privaten Endverbrauch (minus 47 %).

Einschränkungen

> Ziel war es, ambitionierte Einspar- bzw. Vermeidungspotenziale zu ermitteln.

> Die hier wiedergegebenen Einspar- bzw. Vermeidungspotenziale wurden **überschlägig berechnet**.

> Dabei wurden zum Teil auch **starke Verhaltensänderungen** bei Abfüllern, Handel und Endverbraucher angenommen.

> Für die verschiedenen Kategorien konnten die **Größenordnungen der Optimierungen** bestimmt werden.

> Die Vermeidungs- und Einsparpotenziale können für die verschiedenen Kategorien auch sehr viel differenzierter oder unter anderen Marktveränderungen berechnet werden.

Inhalt

1. Hintergrund und Zielsetzung der Studie

2. Gegenstand der Studie

3. Annahmen

4. Ergebnisübersicht

5. Fazit

6. Quellenverzeichnis

Fazit

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

> In Deutschland wurden **2020 18,8 Mio. Tonnen Verpackungen** verbraucht.

> Bei **moderaten Verhaltensänderungen und Nutzeneinbußen** können **5,5 Mio. Tonnen** (29,4 %) des Verpackungsverbrauchs **eingespart** werden.

> In einem optimierten Szenario mit höheren Mehrweganteilen, einem höheren Anteil flexibler Verpackungen und optimierten Verpackungsgewichten werden ausschließlich **13,3 Mio. Tonnen Verpackungen** verbraucht.

> Das **größte Einsparpotenzial** bietet die Umstellung auf **Mehrwegverpackungen**. 2,5 Mio. Tonnen Verpackungen können durch höhere Mehrwegquoten eingespart werden.

Inhalt

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

1. Hintergrund und Zielsetzung der Studie

2. Gegenstand der Studie

3. Annahmen

4. Ergebnisübersicht

5. Fazit

6. Quellenverzeichnis

> BMEL (2022): Lebensmittelabfälle in Deutschland: Aktuelle Zahlen zur Höhe der Lebensmittelabfälle nach Sektoren.

> ecoplus, BOKU, denkstatt, OFI (2020): Lebensmittel – Verpackungen – Nachhaltigkeit: Ein Leitfaden für Verpackungshersteller, Lebensmittelverarbeiter, Handel, Politik & NGOs. Entstanden aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts „STOP waste – SAVE food“.

> EHI Retail Institute (2021): EHI-Analyse: Weniger Lebensmittelverluste im Handel.

> Fraunhofer CCPE (2022): Kunststoffbasierte Mehrwegsysteme in der Circular Economy.

> GVM (1998): Verpacken ohne Kleinverpackungen, Teilstudie des Projekts “Quantifizierung der ökologischen Effekte bei Substitution von Kleinverpackungen.

> GVM (2007): Marktverluste von Verkaufsverpackungen im Handel.

> GVM (2020): Der deutsche Markt der Verkaufsverpackungen von Frischobst und Frischgemüse 2019.

> GVM (2022a): Entwicklung der Materialeffizienz von Verpackungen.

> GVM (2022b): Erhebung von Daten zu ausgewählten nach SUP-Richtlinie berichtspflichtigen Einwegkunststoffprodukten – Berichtsjahr 2020.

> GVM (2022c): Potenzial der Materialeinsparung bei PPK-Transportverpackungen durch den Einsatz von Mehrwegverpackungen.

> GVM (2022d): Verbrauch und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland.

> GVM; ifeu (2021): Potenzial der Abfallvermeidung und des Ressourcenschutzes bei Reduktion von übermäßigen Verpackungen.

> ifeu (2021): Comparative Life Cycle Assessment of different pouches and alternative packaging systems for food (Pasta Sauce and Olives) on the European market.

> iöw (2020): Einkaufsgewohnheiten und Einflussfaktoren beim Unverpackt-Einkauf.

> Öko-Institut (2022): Ökologische Verbrauchsteuer zur umweltfreundlichen Lenkung des Getränkeverpackungsmarktes.

> Ökopol; GVM; ISIconsult; Corsus (2020/2021): Die Ökologisierung des Onlinehandels: Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums.

> Ökopol; GVM; Schomerus, T; Versteyl Rechtsanwälte (2022): Förderung von Mehrwegverpackungssystemen zur Verringerung des Verpackungsverbrauchs – Teilbericht I (noch unveröffentlicht).

> SEA (2021): Closed-loop packaging system for the cosmetic industry.

> Thünen-Institut (2022): Monitoring der Lebensmittelabfälle und –weitergabe im Dialogforum Groß- und Einzelhandel 2019/2020.

> *diverse unveröffentlichte Auftragsstudien*

> *diverse unveröffentlichte Vorträge*

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung

GVM Gesellschaft für Verpackungs-
marktforschung mbH
Alte Gärtnerei 1
D-55128 Mainz

Fon +49 (0) 6131.33673 0
Fax +49 (0) 6131.33673 50
info@gvmonline.de
www.gvmonline.de