



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Sekundärrohstoffe in Deutschland

im Auftrag des NABU

Dr. Monika Dittrich, Sonja Limberger, Birte Ewers, Melanie Stalf, Florian Knappe, Regine Vogt

Heidelberg, April 2021



Zusammenfassung	4
Abkürzungsverzeichnis	6
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	7
1 Einführung	9
2 Indikatoren im Überblick	12
2.1 End-of-Life Recycling Rate (EoL RR)	13
2.1.1 Recyclingquote am Beispiel Aluminiumverpackungen	14
2.1.2 Recyclingquote am Beispiel biogener Abfälle	15
2.2 End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR)	17
2.3 Rezyklateinsatzquote	19
2.4 Die zirkuläre Nutzungsrate (CMU)	21
2.5 DIERec und DERec	24
2.6 Gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote	26
2.7 Die Zyklische Nutzungsrate in Japan	28
2.8 Zusammenfassung	30
3 Die Circular Material Use Rate von Deutschland	31
3.1 Methodik zur Berechnung der CMU	31
3.2 Ergebnisse	33
3.3 Steigerungspotenziale	39
3.3.1 Theoretische Steigerungspotenziale durch vollständiges Recycling der Abfälle	39
3.3.2 Technische Potenziale	40
3.3.3 Steigerungspotenziale durch die Energiewende	46
3.3.4 Sonstige Faktoren	49
3.3.5 Zusammenspiel vieler Faktoren und ihre Wirkungen auf die Kreislaufwirtschaft	52
4 Die Substitutionsquote	55
4.1 Definition und Kriterien für einen Einsatz	55
4.2 Gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote	56
4.3 Substitutionsquote für Produkte bzw. Stoffströme	60
4.3.1 Baustoffe	60
4.3.2 Baustoffe 1: Altbeton	62
4.3.2.1 Einführung und Problematik	62
4.3.2.2 Analyse der Kriterien	63
4.3.2.3 Abschließendes Fazit	67
4.3.3 Baustoffe 2: Gips	68
4.3.3.1 Einführung und Problematik	68
4.3.3.2 Analyse der Kriterien	69
4.3.3.3 Abschließendes Fazit	71

Inhalt

4.3.4	Baustoffe 3: Ziegel	73
4.3.4.1	Einführung und Problematik	73
4.3.4.2	Analyse der Kriterien	73
4.3.4.3	Abschließendes Fazit	76
4.3.5	Erden/Komposte, biotische Abfälle, Substrate	77
4.3.5.1	Einführung und Problematik	77
4.3.5.2	Analyse Kriterien	78
4.3.5.3	Abschließendes Fazit	81
4.3.6	Altkleider/Textilien	82
4.3.6.1	Einführung und Problematik	82
4.3.6.2	Analyse der Kriterien zur Eignung einer Substitutionsquote	84
4.3.6.3	Abschließendes Fazit	89
4.3.7	Altholz	91
4.3.7.1	Einführung und Problematik	91
4.3.7.2	Analyse der Kriterien	92
4.3.7.3	Abschließendes Fazit	95
4.3.8	Papier/Altpapier	96
4.3.8.1	Einführung und Problematik	96
4.3.8.2	Analyse der Kriterien	98
4.3.8.3	Abschließendes Fazit	101
4.3.9	Kunststoffabfälle	103
4.3.9.1	Einführung und Problematik	103
4.3.9.2	Analyse der Kriterien	104
4.3.9.3	Abschießendes Fazit	107
5	Fazit und Empfehlungen	109
	Literaturverzeichnis	114

Zusammenfassung

Die weltweite Nachfrage nach Rohstoffen steigt seit Jahrzehnten immer weiter an. Eine verstärkte Kreislaufführung von Rohstoffen über das Recycling von Abfällen aber auch über die Wiedernutzung von Gütern kann den Druck auf Primärrohstoffe mindern. Diese Studie untersucht die Sekundärrohstoffnutzung in Deutschland, der Fokus liegt auf Indikatoren zur Messung der Kreislaufwirtschaft. Gegenwärtig werden unterschiedliche Indikatoren genutzt, manche beziehen sich auf einzelne Abfallfraktionen oder Stoffströme, andere umfassen die gesamte Volkswirtschaft.

Der in Europa gängige Indikator für die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) ist die Circular Material Use Rate (CMU). Die CMU misst die genutzte Sekundärrohstoffmenge im Verhältnis zur Menge aller genutzten Rohstoffe. Dabei wird die Abfallmenge, die einer Wiederverwertung zugeführt wird, als Proxy für die genutzte Sekundärrohstoffmenge genutzt. Der gesamte Materialverbrauch setzt sich aus dem inländischen Materialverbrauch (mit oder ohne Vorketten) und der genutzten Sekundärrohstoffmenge zusammen.

12 % aller in Deutschland genutzten Rohstoffe sind Sekundärrohstoffe. Dabei unterscheidet sich die CMU stark für die einzelnen Materialgruppen. Für fossile Rohstoffe, die überwiegend verbrannt werden, liegt die CMU mit gut 2 % am niedrigsten. Für Metalle, die sehr gut recycelt werden können, ist sie mit 32 % am höchsten. Werden die Vorketten der international gehandelten Güter berücksichtigt, so liegt die CMU etwas niedriger bei 11 %. Im europäischen Vergleich liegt Deutschland im Mittelfeld. In einzelnen europäischen Ländern ist der Anteil der genutzten Sekundärrohstoffe deutlich gestiegen, in Deutschland betrug der Anstieg seit 2010 nur einen Prozentpunkt (11 % in 2010). Steigerungspotenziale sind vorhanden:

- (1) So kann ein größerer Anteil der gesammelten Abfälle wiedergenutzt werden. Würden alle Abfälle wiedergenutzt, könnte die CMU auf 22 % steigen. Dies ist ein theoretisch maximales Potenzial, da sich nicht alle Abfälle zur Wiedernutzung eignen.
- (2) Würden Abfallmengen gesteigert und technische Potenziale ausgeschöpft werden, so könnte die CMU bei ansonsten gleicher Primärrohstoffnutzung auf 14 % gesteigert werden.
- (3) Auch durch die Reduktion der genutzten Primärrohstoffe könnte die CMU erhöht werden. Einen Beitrag können rohstoffsparende Technologien, die Ausweitung der Produktnutzung (z.B. durch längere Lebensdauern von Gütern oder Second-Hand) und auch Suffizienz und Konsumreduktion leisten. Einen besonders großen Beitrag kann eine ambitionierte Energiewende leisten. Basierend auf Szenariorechnungen könnte die CMU unter Ausschöpfung vieler Potenziale einschließlich einer ambitionierten Energiewende auf bis zu 18 % in 2030 erhöht werden.

Die Studie untersucht ferner den Indikator Substitutionsquote, mit dem die tatsächlich eingesetzte Menge Sekundärrohstoffe als Anteil aller genutzten Primär- und Sekundärrohstoffe gemessen wird. Sie wird aktuell für Deutschland nicht erhoben, jedoch zur Förderung der Nutzung von unterschiedlichen Sekundärrohstoffen diskutiert. Im Rahmen dieser Studie

werden Vorschläge erarbeitet, wie ausgehend von aktuellen Messungen der CMU und des Indikators „direct and indirect effects of recovery“ (DIERec) eine gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote ausgestaltet und erhoben werden kann.

Die Eignung einer Substitutionsquote zur Förderung der Sekundärrohstoffnutzung wird an ausgewählten Beispielen untersucht. Eine Substitutionsquote eignet sich, um die Nutzung von

- Altbeton als Substitut für Primärgesteinskörnung
- Recyclinggips als Substitut für Naturgips
- Altziegel als Substitut für Primärgesteinskörnung
- zu Substraten veredelte Komposte als Substitut von Torf
- Altholz als Substitut für Primärholz
- Altpapier als Substitut für Primärholz bei Hygienepapieren
- Kunststoffrezyklate als Substitut für Primärkunststoffe

zu erhöhen.

Abkürzungsverzeichnis

AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
CE	Circular Economy
CMU	Circular Material Use Rate
CO₂-Äq	Kohlenstoffdioxidäquivalente
c.p.	ceteris paribus
DIERec	Direct and Indirect Effects of Recovery
DERec	Direct Effects of Recovery
DMC	Domestic material consumption
DMI	Domestic material input
EC	Europäische Kommission
EU	Europäische Union
EoL-RIR	End-of-life recycling Input Rate
Et al.	et alii
EXP	Exporte
IMP	Importe
Kg	Kilogramm
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LIV	Letzte inländische Verwendung
Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
RC	Recycling
RMC	Raw material consumption
RME	Rohmaterialäquivalente
RMI	Raw material input
SQ	Substitutionsquote
Tsd.	Tausend
T	Tonne
UBA	Umweltbundesamt

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1:	Rohmaterialkonsum (RMC) pro Person in Deutschland, der EU und weltweit in Tonnen Rohstoffäquivalente (RME)	10
Abbildung 2:	Materialflüsse in Deutschland, 2017	13
Abbildung 3:	End-of-Life Recyclingquote	14
Abbildung 4:	End-of-Life Recycling Input Rate	17
Abbildung 5:	End-of-Life Recycling Input Rate für eine Auswahl an Metallen und weiteren Rohstoffen auf EU-Ebene	18
Abbildung 6:	Rezyklateinsatzquote	20
Abbildung 7:	Die zyklische Nutzungsrate (CMU)	21
Abbildung 8:	Überwachungsrahmen der EU für die Kreislaufwirtschaft	22
Abbildung 9:	DERec und DIERec	25
Abbildung 10:	Gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote	27
Abbildung 11:	Zyklische Nutzungsrate in Japan	29
Abbildung 12:	CMU in Deutschland, Variante 1 (Berechnung mit DMC)	33
Abbildung 13:	Komponenten der CMU (2018) im Vergleich	34
Abbildung 14:	Sankey-Diagramm der Materialflüsse in Deutschland im Jahr 2017 mit Handelsströmen in Masse	35
Abbildung 15:	Sankey-Diagramm der Materialflüsse in Deutschland im Jahr 2017 mit Handelsströmen in Rohstoffäquivalenten	36
Abbildung 16:	CMU (2018) in Deutschland und der EU im Vergleich (Berechnung mit Variante 1)	37
Abbildung 17:	CMU (insgesamt) verschiedener EU-Länder im Zeitverlauf (berechnet nach Variante 1)	38
Abbildung 18:	CMU nach Stoffgruppen, wenn genannte Potenziale gehoben werden würden	46
Abbildung 19:	Rohstoffverbrauch (RMC) 2008 - 2018 und Rückgang in 2030 in verschiedenen Szenarien	48
Abbildung 20:	CMU (Variante 2) in 2030 unter verschiedenen Annahmen zur Energiewende	49
Abbildung 21:	Substitutionsquote in 2030 in verschiedenen Green-Szenarien	54
Abbildung 22:	Substitutionsquote in 2050 in verschiedenen Green-Szenarien	54
Abbildung 23:	Erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle 2016-2018 in Mio. t	61
Abbildung 24:	Verwertung der Recycling Baustoffe (RC Gestein) in 2018 in Mio. t (und %)	65
Abbildung 25:	Verbleib von Bauabfällen auf Gipsbasis, 2018 (in t)	70
Abbildung 26:	Verwertungswege von Alttextilien in % (und Tsd. t) für das Jahr 2013 und 2018 im Vergleich	84

Abbildung 27:	Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2013 (ohne Im- und Exporte)	88
Abbildung 28:	Altholzaufkommen nach Herkunftsbereich und Altholzkategorie in 2016 (in Mio. t/Jahr)	94
Abbildung 29:	Verteilung der Einsatzbereiche für Kunststoffrezyklate in 2019 in Prozent	105
Tabelle 1:	CMU in Deutschland, Variante 1 (Berechnung mit DMC)	34
Tabelle 2:	CMU in Deutschland, Variante 2 (Berechnung mit RMC)	37
Tabelle 3:	Theoretische Steigerungspotenziale der CMU	40
Tabelle 4:	Potenziale für Recyclinganteile im Produktsegment für die Hochbauverwendung in %, 2030 und 2050	42
Tabelle 5:	Zielkorridore für eine Substitutionsquote	59
Tabelle 6:	Verwertungsquoten mineralischer Bauabfälle in 2018 und Veränderung gegenüber 2016 (%)	62
Tabelle 7:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Beton	67
Tabelle 8:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Gips	72
Tabelle 9:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Ziegel	76
Tabelle 10:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Erden / Komposte	82
Tabelle 11:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Altkleider / Textilien	90
Tabelle 12:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Altholz	96
Tabelle 13:	Papierarten und deren Produktion in 2019, sowie Veränderung zum Vorjahr	97
Tabelle 14:	Altpapiereinsatzquote in % (2010 bis 2019)	98
Tabelle 15:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Papier/Altpapier	102
Tabelle 16:	Menge der aller verarbeiteten Kunststoffe (primär und sekundär) nach Bereichen in 2019	104
Tabelle 17:	Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Kunststoffverpackungen	107

1 Einführung

Hintergrund

Menschliches Leben ist ohne die Nutzung von Rohstoffen nicht vorstellbar. Weltweit verbrauchte jeder Mensch im Durchschnitt etwa 12 Tonnen Rohstoffe in 2017 (UNEP 2020). Für Menschen in der Europäischen Union lag der Verbrauch etwas höher, bei durchschnittlich 14,5 Tonnen (Eurostat 2020a). Wurden in 1970 weltweit etwa 27 Mrd. Tonnen Rohstoffe der Natur entnommen, so waren es 91 Mrd. Tonnen in 2017 (UNEP 2020). Angesichts der zunehmenden Bevölkerung und des steigenden Wohlstandes ist auch zukünftig mit weiteren Anstiegen zu rechnen. Die OECD (2019) geht davon aus, dass bei anhaltendem Trend in 2060 sogar bis zu 167 Mrd. Tonnen Rohstoffe von Menschen nachgefragt werden.

Jede Rohstoffnutzung ist mit Umweltwirkungen verbunden, darunter Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, (sowie) Wasser- und Flächeninanspruchnahmen. Extraktion, Verarbeitung und Nutzung sowie Entsorgung von Rohstoffen verursachen weltweite Treibhausgasemissionen von jährlich mehr als 50 Mrd. Tonnen CO₂-Äq. Die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre führt global und auch in Deutschland bereits zu spürbaren Temperaturanstiegen; so lag die Durchschnittstemperatur in Deutschland in 2019 bei 10,3°C, im Gegensatz zu 8,3°C in der Referenzperiode 1960 und 1990 (UBA 2020a). Flächenbelegungen und Flächenumwandlungen, die für die Produktion von Nahrungs- und Futtermittel und zunehmend auch für weitere biotische Rohstoffe wie Energiepflanzen genutzt werden, sind unter anderem mitverantwortlich für einen beispiellosen Rückgang der Biodiversität.

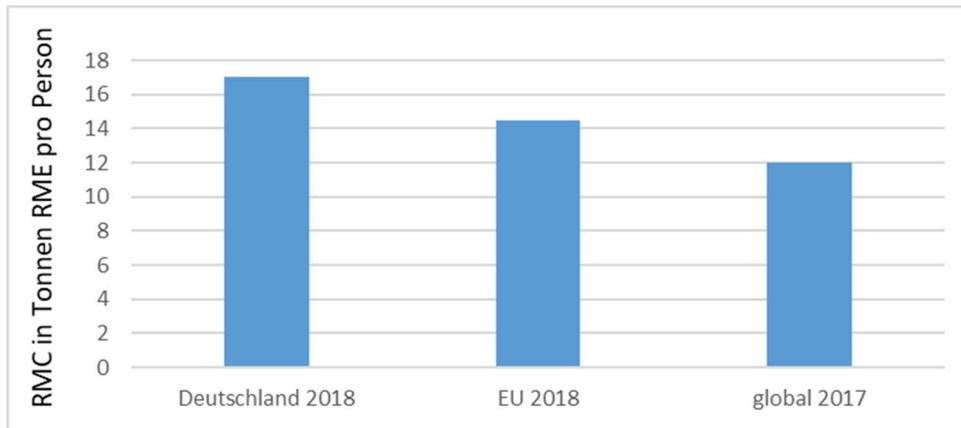
Die Umweltbelastungen unterscheiden sich teilweise erheblich zwischen den verschiedenen Rohstoffen und abhängig von ihrer Nutzungsform. Man unterscheidet biotische von abiotischen Rohstoffen, die wiederum in Metallerze, nicht-metallische Mineralien und fossile Rohstoffe unterteilt werden. Zu den biotischen Rohstoffen gehören beispielsweise Nahrungs- und Futtermittel, aber auch Holz oder Pflanzenfasern. Metalle umfassen die Basismetalle Eisen, Kupfer, Aluminium und Blei sowie Technologie- und Edelmetalle. Zu den mineralischen Rohstoffen gehören aufgrund ihrer Einsatzmenge sogenannte Massenrohstoffe wie Sand, Kies und Schotter, aber auch Kalk, Gips, Ton, Salze oder Industriemineralien. Fossile Rohstoffe beinhalten Erdöl, Erdgas, Kohle und Torf¹ (Eurostat 2018a).

In Deutschland werden gegenwärtig (2018) rund 1 Mrd. Tonnen Rohstoffe abgebaut, weitere 0,7 Mrd. Tonnen Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren werden importiert (Destatis 2020a). Abzüglich der Exporte von 0,4 Mrd. Tonnen werden in Deutschland etwa 1,3 Mrd. Tonnen Rohstoffe verbraucht. Rechnet man die Vorketten der Im- und Exporte hinzu, importiert Deutschland Güter im Umfang von rund 1,8 Mrd. Tonnen Rohstoffäquivalente und exportiert 1,4 Mrd. Tonnen Rohstoffäquivalente (eigene Berechnung). Der durchschnittliche Pro-

¹ Die vollständige Zuordnung ist in Eurostat, 2018a, definiert.

Kopf-Verbrauch von Rohstoffen liegt in Deutschland mit knapp 16 Tonnen (17 Tonnen einschl. Vorketten, RMC) deutlich über dem globalen und auch über dem europäischen Durchschnitt (Abbildung 1).

Abbildung 1: Rohmaterialkonsum (RMC) pro Person in Deutschland, der EU und weltweit in Tonnen Rohstoffäquivalente (RME)



Quellen: Deutschland und EU: eigene Berechnungen, global: materialflows.net

Sowohl aus ökologischer Perspektive als auch aus Erwägungen zur globalen Ressourcengerechtigkeit ist in Deutschland eine Reduktion des Rohstoffverbrauchs und der damit verbundenen Umweltbelastungen im In- und Ausland notwendig. Dies ließe sich mit unterschiedlichen Ansätzen erreichen, beispielsweise mit einem effizienteren Umgang mit den Rohstoffen oder auch durch Substitution von umweltschädlicheren durch weniger umweltschädliche Rohstoffe. Eine weitere, sehr wichtige Strategie ist die Nutzung von Abfällen, die – wiederaufbereitet – Primärrohstoffe ersetzen. In der Regel ist die Nutzung von Rezyklaten mit weniger Umweltbelastungen verbunden als der Einsatz von Primärrohstoffen, weiterhin werden Abbauf Flächen und damit Eingriffe in die Natur sowie Deponieflächen reduziert.

Die Erhöhung des Einsatzes von so genannten Sekundärrohstoffen zur Senkung der Nachfrage nach Primärrohstoffen ist ein erklärtes Ziel der Europäischen Union und auch der deutschen Politik. „Circular Economy“, im Deutschen: „Kreislaufwirtschaft“, ist ein Konzept, das nicht nur in Deutschland, sondern zunehmend auch weltweit als ein wichtiger Lösungsbaukasten angesehen wird. Zur Förderung der Ressourceneffizienz und Circular Economy hat die Europäische Kommission im Januar 2020 die Flagship-Initiative „A resource efficient Europe“ sowie den „Aktionsplan für eine Kreislaufwirtschaft“ (EC 2020a) aktualisiert und im September 2020 den „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ veröffentlicht (EC 2020b). Ebenso in diesem Jahr veröffentlichte das Bundesumweltministerium (BMU 2020a) das aktualisierte Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes III).

Zur Erfolgsbewertung der Kreislaufwirtschaft sind quantitative Indikatoren notwendig. Diese dienen dem Monitoring und zudem als Grundlage für politische Steuerungsinstrumente, z.B. in Form gesetzlicher Quotenvorgaben. Gegenwärtig liegen zahlreiche Indikatoren vor, die bislang unterschiedlich weit entwickelt sind und an unterschiedlichen Messstellen ansetzen. **Recyclingquoten** beschreiben beispielsweise die Abfallmengen, die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, im Verhältnis zur gesamten Abfallmenge. Sie quantifizieren jedoch nicht die rezyklierte Menge und ebenso wenig, ob diese rezyklierte Menge tatsächlich einer Nutzung zugeführt wird und Primärmaterial substituiert. Die **Circular Material Use Rate (CMU)** setzt dem Recycling zugeführten Abfall in Verhältnis zum

gesamten Materialeinsatz und geht damit über die Recyclingquote hinaus und fokussiert den Einsatz von Sekundärmaterial. Der Aktionsplan Kreislaufwirtschaft der Europäischen Kommission (EC 2020a) hat zum Ziel, die Circular Material Use Rate innerhalb eines Jahrzehnts zu verdoppeln. Derzeit liegt sie in der EU bei etwa 11 Prozent. Die Menge an tatsächlich recyceltem Material, das einer Wiedernutzung zugeführt wird, im Verhältnis zum insgesamt genutzten Material wird durch die **End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR)** abgebildet. Der Indikator wurde bislang jedoch nur für ausgewählte Materialien erhoben. Er ist mit der Substitutionsquote vergleichbar, die von der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (Ressourcenkommission am Umweltbundesamt 2019) in Deutschland verstärkt in die Debatte eingebracht wurde. Weitere Indikatoren für die Bewertung des Sekundärrohstoffeinsatzes sind die **Direct (and Indirect) Effects of Recovery (DERec / DIERec)**, die im aktuellen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes III, BMU (2020b)) genannt und im Rahmen einer Studie für das Umweltbundesamt (Steger et al. 2019) für ausgewählte Materialien berechnet wurden.

Ziel und Aufbau der Studie

Ziel dieser Studie ist, die Entwicklung und Nutzung von gesamtwirtschaftlichen, material- und produkt(gruppen)spezifischen Indikatoren, die den tatsächlichen Einsatz von Recyclingmaterialien abbilden, voranzubringen, um sowohl die Fortschritte in der Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft besser messen als auch konkrete politische Forderungen für den Sekundärrohstoffeinsatz in Deutschland formulieren zu können.

Dazu werden zunächst verschiedene Indikatoren, die die Kreislaufführung von Produkten, Stoffströmen und von Ökonomien messen, verglichen (Kapitel 2). Hierbei werden, unter Nutzung von Beispielen, die gesetzlichen Vorgaben genannt, die genaue Definition und Messung detailliert dargestellt und darauf aufbauend werden Vor- und Nachteile sowie Limitierungen des Indikators benannt.

Das Kapitel 3 widmet sich der Circular Material Use Rate (CMU). Nach einer detaillierteren Beschreibung der Berechnung wird die CMU für Deutschland ausgewiesen und die Ergebnisse werden mit anderen EU-Ländern verglichen (Kapitel 3.2). Im Kapitel 3.3 werden Steigerungspotenziale untersucht, zum einen Potenziale zur Steigerung der rezyklierten Mengen (Zähler) und zum anderen Potenziale zur Senkung des Primärmaterialkonsums (Nenner).

Im Kapitel 4 wird die Substitutionsquote untersucht. Einführend werden Kriterien benannt, die hilfreich bei der Frage sind, inwieweit eine Substitutionsquote ein guter Indikator sein kann. Hier geht es darum, die prinzipielle Eignung der Substitutionsquote zu analysieren, nicht aber um die Bewertung, ob diese ein besseres Instrument als andere Indikatoren ist. Im Folgenden wird dies anhand konkreter Stoffströme und Produkte untersucht, zunächst für die gesamte Volkswirtschaft und im Anschluss für ausgewählte Stoffströme und Produkte.

Das abschließende Kapitel 5 fasst wesentliche Erkenntnisse und Empfehlungen zusammen.

2 Indikatoren im Überblick

Das Ausmaß der Kreislaufwirtschaft kann unterschiedlich gemessen werden. Ein sehr klassischer Indikator ist die Recyclingquote, die an einem Abfallprodukt oder an einem Abfallstrom ansetzt und bemisst, welcher Anteil der Abfallmenge einer stofflichen Verwertung zugeführt wird. Neuere Indikatoren schauen stärker auf die rezyklierten Produkt- bzw. Abfallmengen, die in den Kreislauf wieder eingespeist werden, und Primärrohstoffe ersetzen.

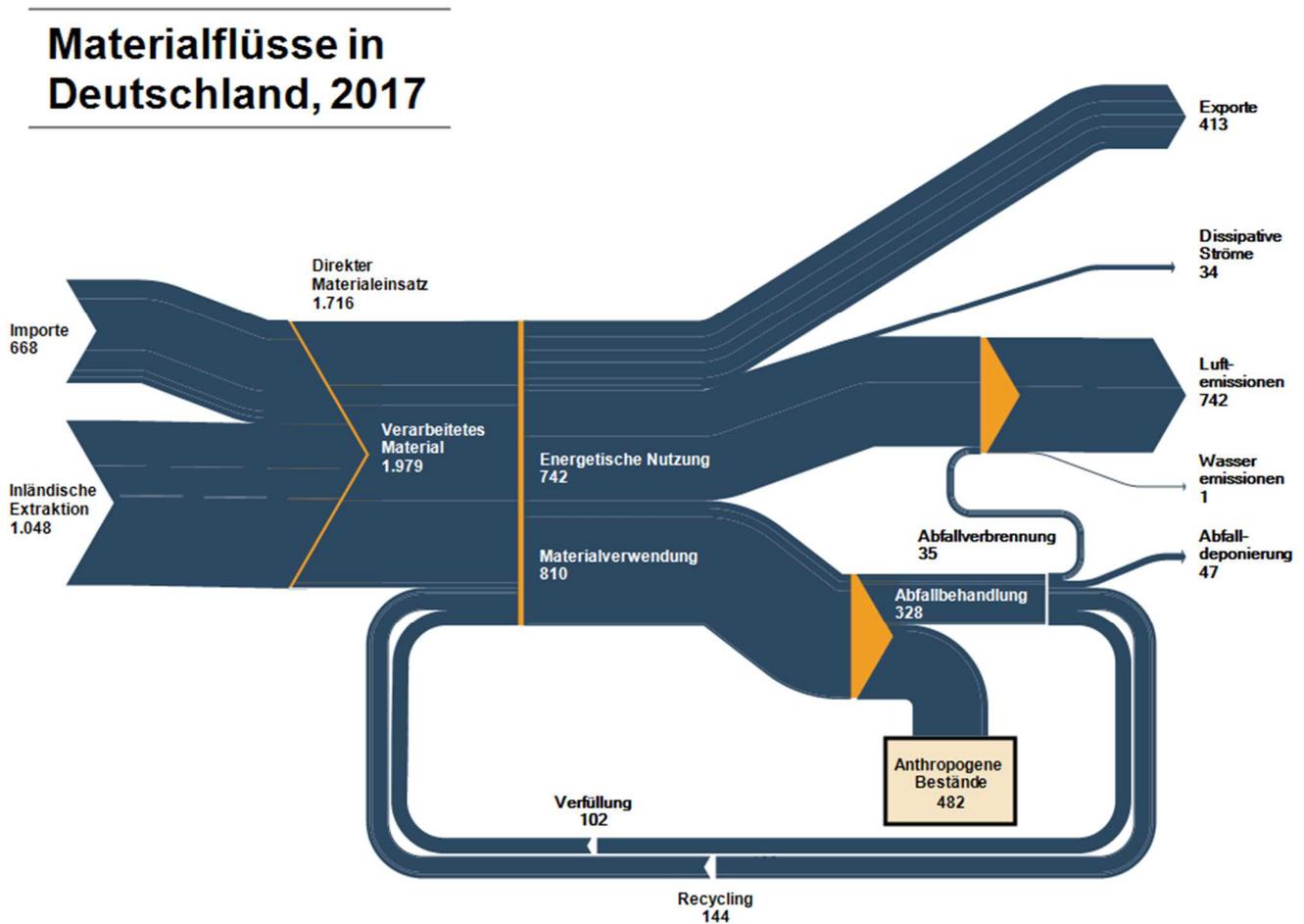
In diesem Kapitel werden ausgewählte Indikatoren, mit denen eine Kreislaufführung gemessen werden kann, vergleichend beschrieben. Die Auswahl berücksichtigt unterschiedliche Ansatzpunkte, deckt verschiedene Produkte und Abfälle ab und integriert ebenso mehrere Indikatoren, die auf gesamtwirtschaftlicher Ebene in Deutschland, der EU und in anderen Ländern diskutiert bzw. angewendet werden:

- Produktspezifische Recyclingquoten am Beispiel Aluminiumverpackungen
- Abfallfraktionsspezifische Recyclingquoten am Beispiel biogener Abfälle
- End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR) am Beispiel von Metallen
- Rezyklateinsatzquote am Beispiel der Altpapiereinsatzquote
- Circular Material Use Rate (zyklische Nutzungsrate, CMU) der Europäischen Union
- DIERec und DERec
- Die gesamtwirtschaftliche Substitutions- oder Zirkularitätsquote
- Die zyklische Nutzungsrate (Japan)

Für jeden Indikator wird die politische Zielsetzung beschrieben, deren Erreichungsgrad mit dem Indikator gemessen wird. Anhand von konkreten Beispielen wird erläutert, wie die Indikatoren genau berechnet werden, und Vor- bzw. Nachteile werden benannt.

Abbildung 2 zeigt schematisch die Stoffflüsse von Deutschland in 2017 (siehe Kapitel 3 für detaillierte Erläuterungen und Daten). Links sind die heimischen Extraktionen und Importe zu sehen, die zusammen die Stoffflüsse darstellen, die in einer Volkswirtschaft verarbeitet werden. Rechts sind die Verwendung bzw. der Verbleib der genutzten Rohstoffe abgebildet: ein Teil wird exportiert, ein weiterer Teil fließt in den anthropogenen Stock, beispielsweise in Gebäude oder Güter. Ein Teil verschwindet, ohne dass der Verbleib bekannt ist (dissipative Verluste). Ein weiterer Teil wird verbrannt und emittiert, ein weiterer wird zu Abfall, der auf der Deponie verbracht oder aber aufbereitet wird und in die Produktion wieder einfließt und somit im Kreislauf geführt wird. Die Indikatoren, die nun die Kreislaufführung unterschiedlich beschreiben, setzen an unterschiedlichen Stellen der Stoffströme an, dies wird im Folgenden für jeden Indikator so gut wie es die Darstellung zulässt aufgezeigt.

Abbildung 2: Materialflüsse in Deutschland, 2017

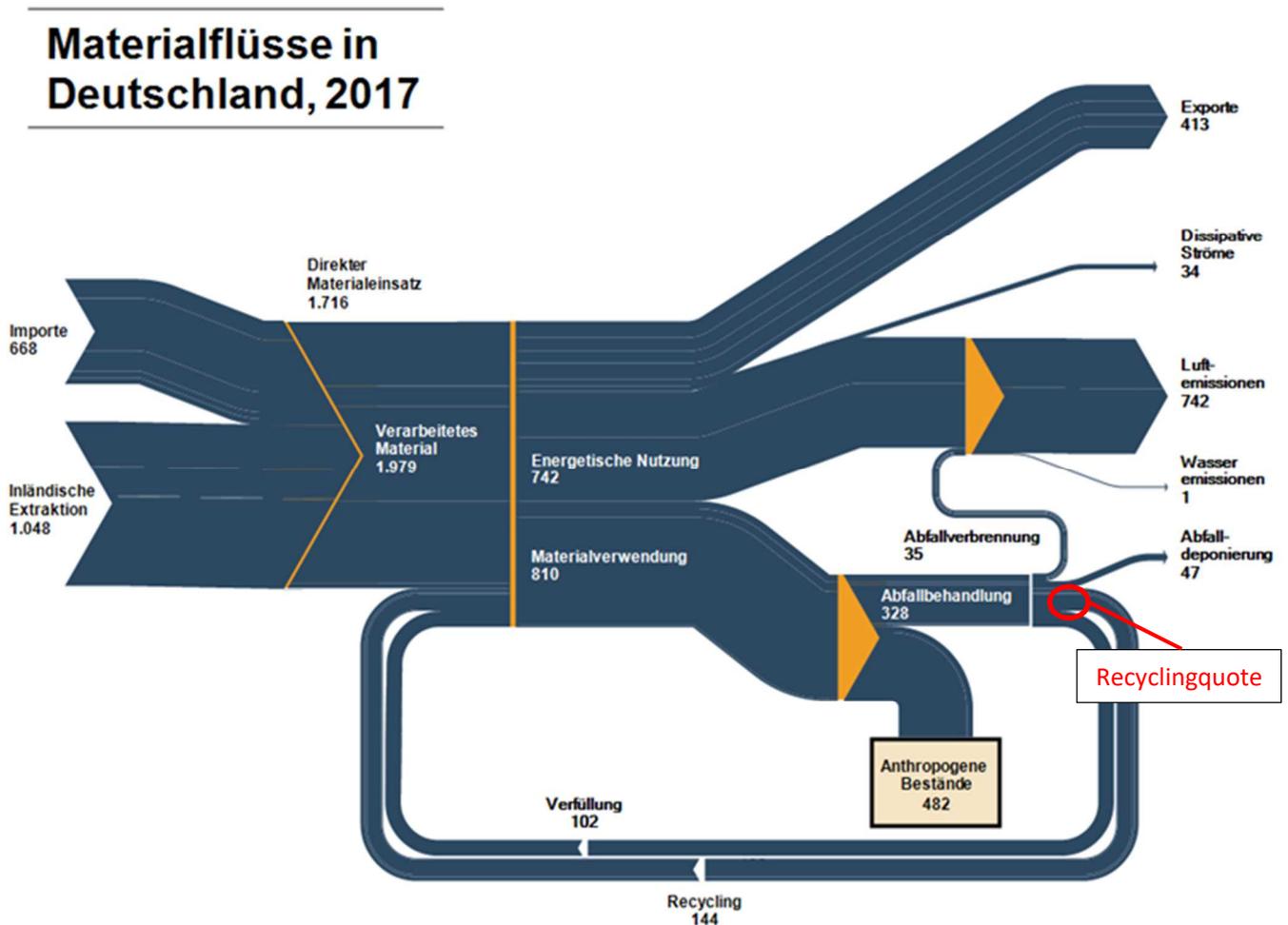


Quelle: eigene Darstellung

2.1 End-of-Life Recycling Rate (EoL RR)

End-of-Life Recycling Raten, oft auch Recyclingquote genannt, bemessen den Anteil der Abfälle, der einer stofflichen Verwertung zugeführt wird, an der Gesamtmenge der Abfälle. Die Recyclingquote kann sich auf ein Produkt, eine Produktgruppe oder einen Abfallstrom beziehen. Im Folgenden werden anhand der zwei Beispiele Aluminiumverpackungen und bio-tische Abfälle spezifische Berechnungen sowie Vor- bzw. Nachteile aufgezeigt.

Abbildung 3: End-of-Life Recyclingquote



Quelle: eigene Darstellung ifeu. Bitte beachten: Die Verfüllung ist nicht in EoL RR enthalten, Verfüllung ist nach geltender rechtlicher Begriffsbestimmung zwar eine stoffliche Verwertung, aber kein Recycling (§3 KrWG Novelle); verfüllte Materialien führen nicht zu einer Rückführung von (rohstofflichen) Massenströmen in den Wirtschaftskreislauf (lediglich monetär).

2.1.1 Recyclingquote am Beispiel Aluminiumverpackungen

Gesetzliches Ziel: Die EU-Verpackungsrichtlinie 94/62/EG bzw. die Änderung durch die Richtlinien (EU) 2018/852 schreibt ab dem Jahr 2025 konkrete Recyclingquoten für Verpackungen vor, dazu zählen Plastik, Holz, Eisenmetalle, Glas, Papier und Kartonpapier sowie Aluminium. Ab 2025 sollen insgesamt 65 Gewichtsprozent (Gew. %) aller Verpackungsabfälle wiederverwertet werden. Für die einzelnen Kategorien gibt es noch spezifizierte Vorgaben, darunter fallen auch 50 Gew. % für Aluminiumverpackungen bis 2025 und 60 Gew. % bis 2030.¹ Die EU-Vorgaben wurden im deutschen Verpackungsgesetz (VerpackG) umge-

¹ 50 Gew. % Plastik, 25 Gew. % Holz, Gew. 70 Gew. % Eisenmetalle, 70 Gew. % Glas und 75 Gew. % Papier und Kartonpapiere bis 2025 und 55 Gew. % Plastik, 30 Gew. % Holz, 80 Gew. % Eisenmetalle, 75 Gew. % Glas und 85 Gew. % Papier und Kartonpapier bis 2030.

setzt und sehen gemäß §16 VerpackG für Aluminiumverpackungen aus Systembeteiligungsmengen eine Recyclingquote (oder der Vorbereitung zur Wiederverwendung) von 80 Gew. % Prozent (bis 2022) und 90 Gew. % Prozent (ab 2022).

Berechnung: Im Jahr 2018 lag die Quote der stofflichen Verwertung in Deutschland bei Aluminiumverpackungen bei 90,1 Gew. %. Die Quote bezieht sich auf die stofflich zu verwertenden Abfälle am gesamten Anteil von anfallenden Verpackungsabfällen von Aluminium. Zur stofflichen Verwertungsmenge zählen alle gebrauchten Verpackungen, die über duale Systeme, Pfandsysteme, Branchenlösungen, gewerbliche Sammlungen und sonstigen Sammlungen z.B. aus der Glasaufbereitung und der werkstofflichen Verwertung aus MBA und MVA gesammelt werden. Die Menge der anfallenden Verpackungsabfälle setzt sich aus der Produktion von Aluminiumverpackungen unter der Berücksichtigung von Importen und Exporten von leeren Verpackungen zusammen und wird unter dem Begriff Verpackungseinsatz zusammengefasst. Der Verpackungseinsatz mit den Importen und Exporten von verpackten Waren ergibt die verbrauchte Marktmenge. Die verbrauchte Marktmenge wiederum, abgezogen der Nichtverpackungen, bildet den bereinigten Verbrauch ab. Weiter wird noch eine Korrektur für die Überschneidung mit der Kunststoffverwertung eingepflegt. (UBA 2020b)

Vorteile: Ein Vorteil dieser Quote ist es, dass sie Auskunft darüber gibt, welcher Anteil der Abfallmenge dem Recycling von Verpackungen wieder zugeführt wird.

Nachteile und Limitierungen: (1) Ein wesentlicher Nachteil der inputorientierten EoL-RR ist, dass diejenigen Mengen berücksichtigt werden, die vor der Aufbereitung dem Recycling zur Verfügung stehen und nicht die Netto-Mengen abzüglich Verunreinigungen und Fehlwürfen, die tatsächlich einem Recycling zur Verfügung stehen. Insbesondere bei Aluminium ist der Verlustanteil (durch Aufbereitung) mit ca. 60 – 70 % hoch (UBA 2020) (2) Eine Herausforderung bei der Berechnung sind die Verbundverpackungen; sie können zu fehlerhaften Zuordnungen führen, so dass Doppelzählungen die Folge sein können. (3) Die Quote zeigt zudem nicht, ob Alu-Verpackungen aus ökologischer Perspektive alternativen Verpackungen vorzuziehen sind – dies gilt ebenso für die im weiteren untersuchten Kreislaufwirtschaftsindikatoren. Es sei darauf verwiesen, dass diesbezügliche Aussagen auch nicht Ziel der Indikatoren sind. (4) Die Recyclingrate bildet zudem nicht den gesamten Einsatz von Sekundärrohstoffen ab. Derzeit liegt das Angebot an Sekundärrohstoffen weit unter dem Materialbedarf der Wirtschaft, trotz relativ hoher Recyclingquoten. (EC 2018a)

Des Weiteren gibt der Indikator EoL-RR (wie auch andere Indikatoren, u.a. EoL-RIR oder CMU) keine Auskunft über Veränderungen der Gesamtmenge an Verpackungen. So bildet der Indikator nicht ab, dass die Aluminiumnutzung und die Verpackungsmengen aktuell steigen (UBA 2020b).

2.1.2 Recyclingquote am Beispiel biogener Abfälle

Gesetzliche Vorgabe: Die EU-Abfallrahmenrichtlinie fordert eine abfallfraktionsspezifische Recyclingquote von 65 Gew.% für Siedlungsabfälle bis 2030 (Obermeier, Thomas / Lehmann, Sylvia 2018). In Deutschland bestand im Kreislaufwirtschaftsgesetz die Vorgabe, dass 65 % aller Siedlungsabfälle bis 2020 recycelt werden sollen (UBA 2020c). Nach aktueller Rechtslage wurde die Zielvorgabe an die der Abfallrahmenrichtlinie angepasst. In 2018 wurden

nach früherer Berechnungsmethode¹ ca. 66 % der Siedlungsabfälle in Deutschland recycelt (Europäisches Parlament 2018).

Zu den Siedlungsabfällen zählen ebenfalls biogene Abfälle, diese werden nicht durch eigene Quoten erfasst, sondern fließen in die Quote der Siedlungsabfälle mit ein (BDE / Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. 2020). 2016 zählten rund 25 % des Siedlungsabfalls zur Kategorie „Bioabfall“ in Deutschland (UBA 2018a).

Biogene Abfälle sind auch in gewerblichen Abfällen enthalten. Gemischt gesammelte Gewerbeabfälle sind an Zielsetzungen der Gewerbeabfallverordnung für das Recycling von 30 Massenprozent ab 2019 gebunden. Die Quote von 30 % muss dokumentiert und eingehalten werden, jedoch zählt eine Unterschreitung der Quote nicht als Ordnungswidrigkeit. Bioabfälle müssen laut der Verordnung getrennt gesammelt werden (BDE / Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. 2020).

Ziele auf EU-Ebene beziehen sich hauptsächlich auf die (Einführung einer) getrennte(n) Sammlung von Bioabfällen. Im Rahmen der Datenerfassung der EU unterliegen auch biogene Abfälle einem Monitoring.

Berechnung: Die RQ für Siedlungsabfälle (EU-RL 2018/851/EG) wird als das Verhältnis von kompostiertem Siedlungsabfall (Output des Kompostierungsprozesses, einschließlich Vorbereitung zur Wiederverwendung) zum Abfallaufkommen gemessen.

Auf EU-Ebene sind keine zuverlässigen Daten über das Abfallaufkommen für Bioabfälle bekannt, da ein Teil des Bioabfalls in den gemischten kommunalen Abfällen endet. Mitgliedstaaten sollen gemäß der novellierten Abfallrahmenrichtlinie bis Ende 2023 sicherstellen, dass Bioabfälle getrennt gesammelt und nicht mit anderen Abfallarten vermischt werden. Aktuell werden die Mengen an kompostiertem Bioabfall auf EU-Ebene pro Kopf überwacht. Damit wird auf eine Vergleichbarkeit zwischen den Mitgliedsstaaten abgezielt und es besteht die Möglichkeit, Fortschritte zu erkennen. Das Pro-Kopf-Recycling von Bioabfällen variiert zwischen den Mitgliedstaaten und reicht von weniger als 10 kg pro Kopf in einigen Mitgliedsstaaten bis zu mehr als 100 kg pro Kopf in anderen. Im Zeitraum zwischen 2005 und 2016 hat das Pro-Kopf-Recycling von Bioabfall in allen Mitgliedsstaaten, mit nur wenigen Ausnahmen, zugenommen (EC 2018a). In Deutschland betrug die Menge der pro Kopf kompostierten (recycelten) Siedlungsabfälle im Jahr 2017 114 kg pro Kopf (Eurostat 2020b).

Vorteile: Vorteilhaft ist, dass die novellierte Abfallrahmenrichtlinie eine outputbasierte Berechnungsmethode für die stoffliche Verwertung von Siedlungsabfällen vorsieht und damit nur diejenigen Mengen berücksichtigt werden, die tatsächlich einem Recycling zugeführt werden.

Nachteile und Limitierungen: Eine Limitierung der Berechnung der abfallfraktionsspezifischen Recyclingquote von Bioabfällen liegt darin, dass keine Aussagen darüber getroffen werden, in welchem Umfang und an welcher Stelle der recycelte Bioabfall wiederverwendet wird. Der Indikator ist auf die Vergleichbarkeit zwischen den EU-Staaten ausgerichtet, zeichnet sich jedoch nicht durchweg durch konkrete einheitliche Vorgaben aus. Es ist zu beachten, dass die Vergleichbarkeit dadurch geschwächt werden kann, dass manche Länder nur die Kompostierung von getrennt gesammeltem Bioabfall als Recycling werten, während an-

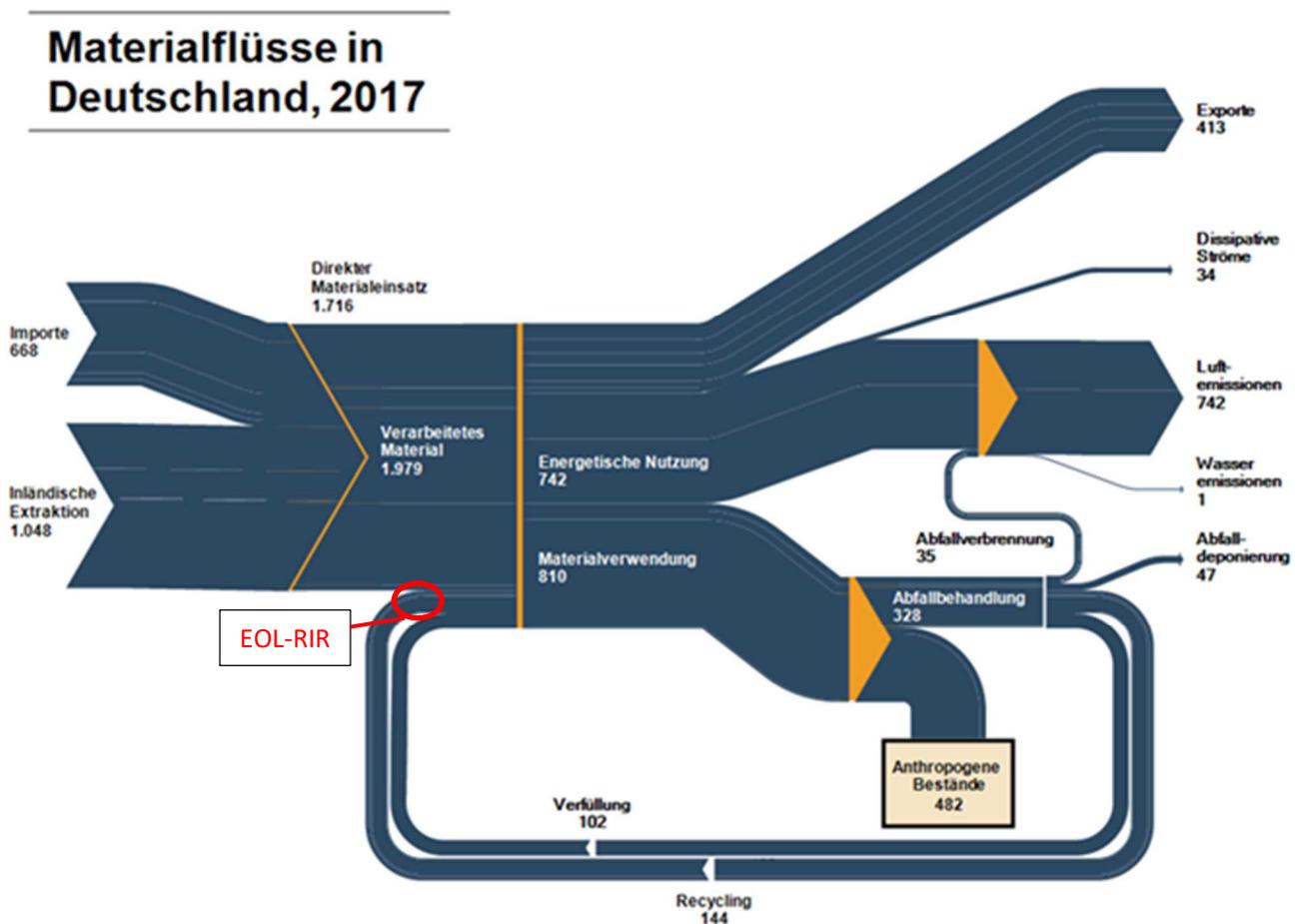
¹¹ Die novellierte Abfallrahmenrichtlinie (EU-RL 2018/851/EG) legt eine neue, outputbasierte Berechnungsmethode für die stoffliche Verwertung von Siedlungsabfällen (einschließlich Vorbereitung zur Wiederverwendung) fest.

dere Länder, unter anderem Deutschland, auch organisches Material einschließen, das mechanisch-biologisch verwertet wird (EC 2018a). Ebenfalls zu Limitierungen kommt es, da es immer noch einen Anteil an biogenen Abfällen gibt, der nicht getrennt gesammelt wird und nicht berücksichtigt werden kann. Der Indikator auf EU-Ebene ist noch stark auf Schätzungen angewiesen und liefert keine konkreten Zahlenwerte. Der Indikator gibt keine Auskunft über die Substitution von primärer Biomasse.

2.2 End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR)

Die EOL-RIR setzt an den Stoffflüssen an, die in das Wirtschaftssystem hineinfließen. Die Rate quantifiziert den Anteil der Sekundärmaterialien im Verhältnis zur gesamten eingesetzten Menge (primär und sekundär). Sie wird im Folgenden am Beispiel der Metalle dargestellt.

Abbildung 4: End-of-Life Recycling Input Rate



Quelle: eigene Darstellung. Bitte beachten (hier und in folgenden Abbildungen): Die Verfüllung ist nicht in EoL RIR enthalten, Verfüllung ist nach geltender rechtlicher Begriffsbestimmung zwar eine stoffliche Verwertung, aber kein Recycling (§3 KrWG Novelle); verfüllte Materialien führen nicht zu einer Rückführung von (rohstofflichen) Massenströmen in den Wirtschaftskreislauf (lediglich monetär).

Gesetzliche Vorgaben: Gegenwärtig gibt es (noch) keine konkreten Zielsetzungen für eine EOL-RIR; auch nicht für Metalle. Metalle werden nur zum Teil durch die EU-Verpackungsrichtlinie 94/62/EG abgedeckt. Es findet jedoch eine Datenerfassung für ausgewählte Metalle in der EU statt. Diese und deren zugehörige EOL-RIR können Abbildung 5 entnommen werden. Die Erfassung der EOL-RIR ist Teil der Methodik zur Erstellung der Liste für die EU kritischen Rohstoffe, die von der Kommission alle drei Jahre durchgeführt wird. (EC 2018a)

Abbildung 5: End-of-Life Recycling Input Rate für eine Auswahl an Metallen und weiteren Rohstoffen auf EU-Ebene



* F = Fluorspar; P = Phosphate rock; K = Potash, Si = Silicon metal, B=Borates.

Quelle: "http://eur-lex.europa.eu, © Europäische Union, 1998-2020 (European Comission 2018)

Berechnung: Die EOL-RIR misst, wie viel des gesamten Materialinputs in das Produktionssystem aus dem Recycling von "Altschrott", d.h. von Sekundärmetall aus Altprodukten, stammt. Der EOL-RIR berücksichtigt nicht den Schrott, der aus Herstellungsprozessen stammt, dieser wird teilweise bereits in geschlossenen industriellen Symbiose-Prozessen verwendet (EC 2018a; Eurostat 2020c).

Die Berechnung der EOL-RIR erfolgt über das Verhältnis des Sekundäreinsatzes von Metall zum Primäreinsatz plus dem Sekundäreinsatz von Metall (Eurometaux / Eurofer 2012). Näherungsweise wird der Primärmetalleinsatz als gewonnenes Erz abzüglich der Verluste durch Rückstände und Schlacken berechnet (UNEP 2011).

Die Quoten werden auf EU-Ebene erhoben und nicht auf der Ebene der Mitgliedsstaaten, da die Kapitalintensität bestimmter Recyclingtechnologien und die daraus resultierenden Vorteile sich oft auf Größenvorteile der EU stützen.

Die EOL-RIR wird von verschiedenen Faktoren bestimmt. Der erste Faktor ist die Nachfrage nach Rohstoffen, die bei fast allen Materialien zunimmt. Der zweite bezieht sich auf die Menge an Materialien, die für das Recycling zur Verfügung stehen. Da einige Rohstoffe in langlebigen Investitionsgütern gebunden sind, werden diese erst in einem mittel- bis langfristigen Zeithorizont für das Recycling zur Verfügung stehen. Bei der Interpretation des Indikators muss daher die Menge der Materialien, die für die Wiederverwertung zur Verfügung stehen, berücksichtigt werden, da einige Materialien in langlebigen Investitionsgütern enthalten sind und erst in Zukunft für das Recycling zur Verfügung stehen.

Vorteile: Als positiv einzuschätzen ist, dass der Indikator den Anteil der Sekundärrohstoffe am gesamten Rohstoffbedarf eines Metalls beschreibt, die wieder auf dem Markt verwendet werden, das heißt den tatsächlichen Einsatz von Sekundärrohstoffen thematisiert.

Nachteile und Limitierungen: Nachteilig ist, dass potentielle Versorgungsrisiken durch Sekundärmaterialien keine Berücksichtigung finden (EC 2017).

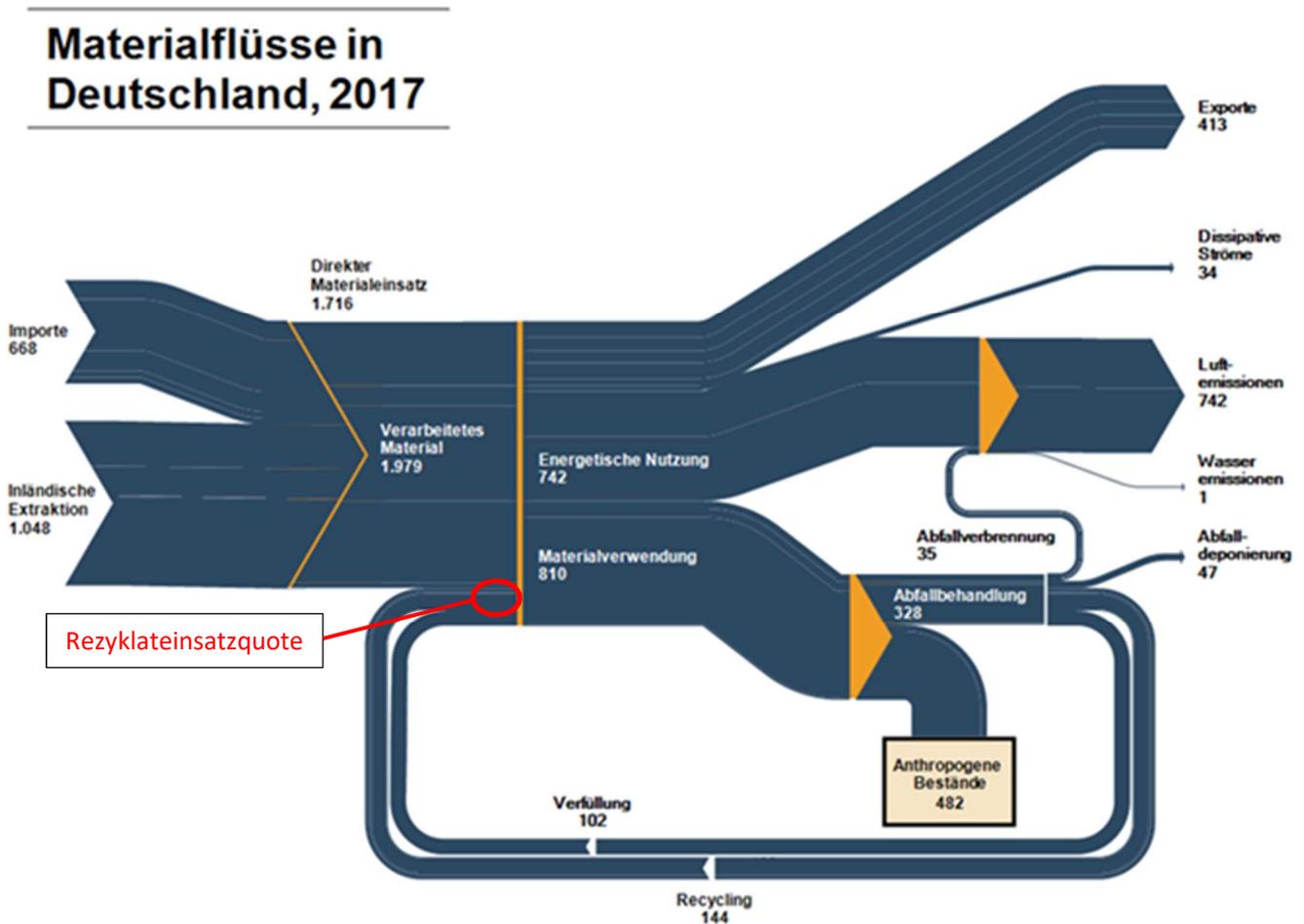
Zudem basiert der Indikator teilweise auf Schätzungen angesichts des Mangels an Daten für bestimmte Stufen der Wertschöpfungskette (Eurostat 2020c). Der Indikator kann außerdem nicht als Indikator für den potenziellen Beitrag des Recyclings zur künftigen Materialnachfrage gesehen werden (EC 2018a).

2.3 Rezyklateinsatzquote

Die Rezyklateinsatzquote ist der EOL-RIR sehr ähnlich. Allerdings wird der Rezyklateinsatz an der Produktmenge und nicht an den Inputflüssen in die Produktion bemessen. Im Folgenden werden Berechnung und Vor- und Nachteile am Beispiel Altpapier bzw. Papierproduktion erläutert. Die Rezyklateinsatzquote wird aktuell beispielsweise auch für Kunststoffe diskutiert (siehe auch Kapitel 4.3.9).

Gesetzliche Vorgaben: Eine allgemeine Zielsetzung auf EU- oder Bundesebene zur Altpapiereinsatzquote existiert nicht. Jedoch gibt es bereits seit 1994 eine Selbstverpflichtung der Arbeitsgemeinschaft für grafische Papiere (AGRAPA), den Einsatz von Altpapier bei der Papierproduktion kontinuierlich zu erhöhen. Konkret verpflichtet hat sich die AGRAPA bislang jedoch nur auf die Zielsetzung, die stoffliche Verwertungsquote von grafischen Papieren dauerhaft auf einem Niveau von rund 80 Prozent zu erreichen zu erreichen (d.h. eine Recyclingquote) (BMU 2020b). Die Altpapiereinsatzquote bezogen auf alle Papiere lag im Jahr 2018 bei 75,9 %, für grafische Papiere lag die Altpapiereinsatzquote bei 51 %. Dies stellt eine Steigerung gegenüber 2000 um 37 % dar (UBA 2019a).

Abbildung 6. Rezyklateinsatzquote



Quelle: eigene Darstellung

Berechnung: Die Quote ist der Anteil des Altpapiereinsatzes in der Papiererzeugung. Sie wird für unterschiedliche Papier- und Pappsegmente ausgewiesen, nicht eingeschlossen werden Altpapierstoff-Exporte (VDP 2020, UBA 2019).

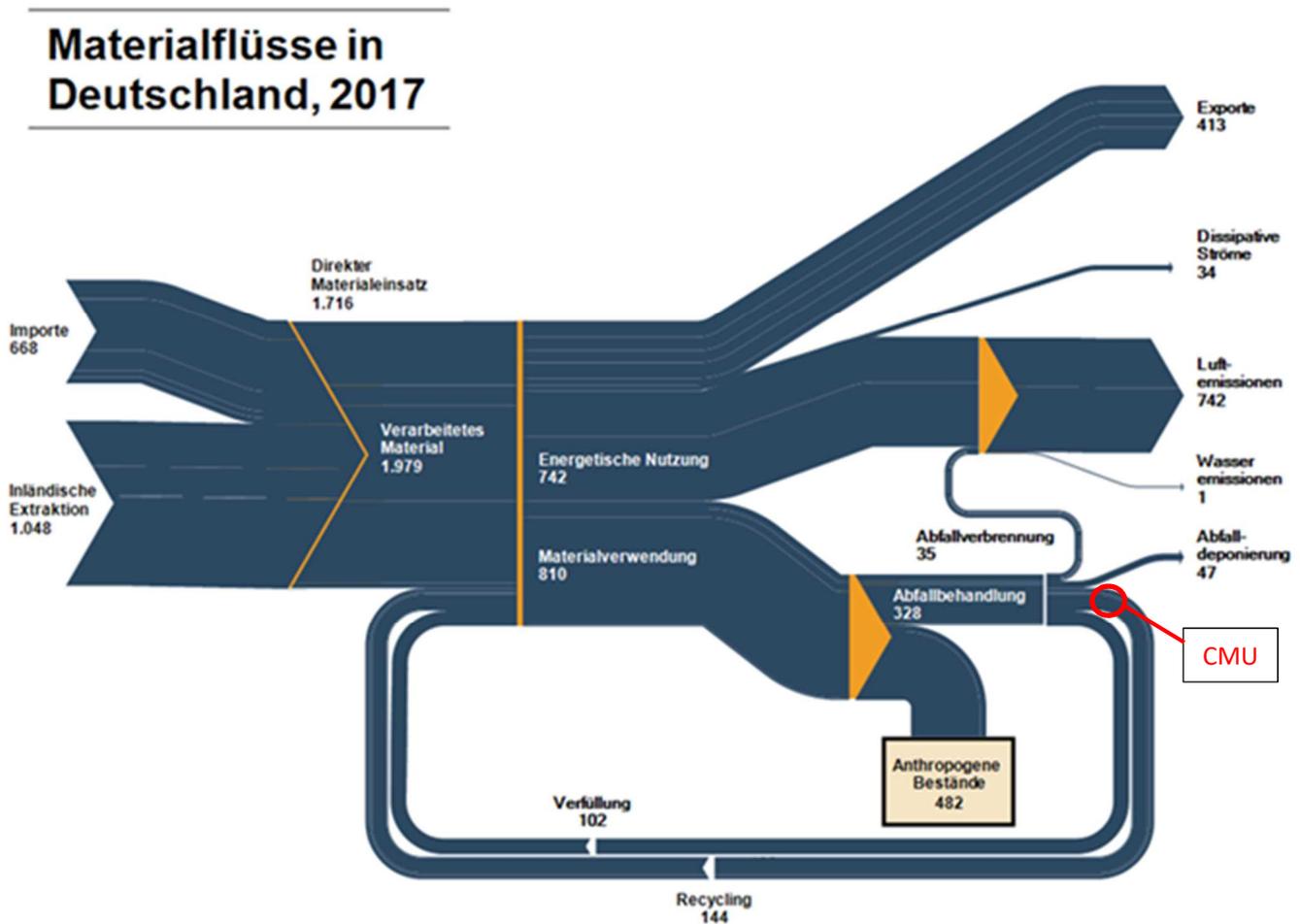
Vorteile: Positiv an der Quote ist zu bewerten, dass diese die Verwendung von Altpapier in Produkten zeigt und damit aufzeigt, wie viel Primärpapier ersetzt und somit eingespart wurde.

Nachteile und Limitierungen: Die starken qualitativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Papiersorten werden bei der Altpapiereinsatzquote nicht einbezogen (NABU 2007). Mit dem Indikator wird keine Aussage über die Qualität des Altpapiers getroffen. Der geringer werdende Einsatz grafischer Papiere durch die Digitalisierung und der vermehrte Einsatz von Kartonage führt weiter zu einer Verschlechterung der Qualität, die im Indikator keine Berücksichtigung findet (Steffen, Friedrich 2018). Ebenfalls werden keine Importe berücksichtigt, die große Teile des nationalen Verbrauchs decken (Deutscher Bundestag 2019).

2.4 Die zirkuläre Nutzungsrate (CMU)

Die zirkuläre Nutzungsrate (circular material use rate) ist definiert als das Verhältnis der im Kreislauf geführten Materialien zur gesamten Rohstoffnutzung. Die CMU wird von der Europäischen Kommission als ein Indikator der Kreislaufwirtschaft genutzt.

Abbildung 7: Die zyklische Nutzungsrate (CMU)



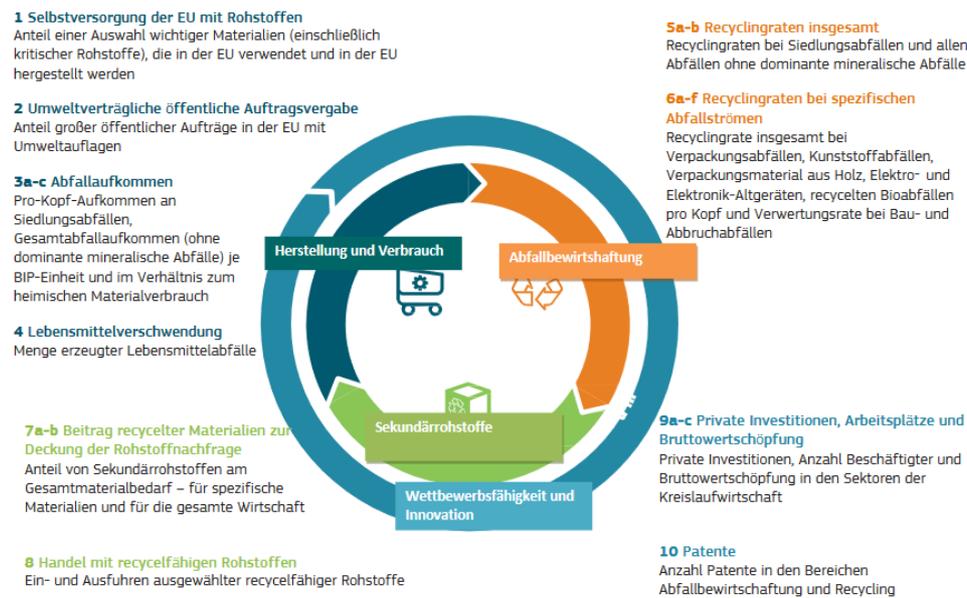
Quelle: eigene Darstellung

Gesetzliche Vorgaben: Die EU hat sich im Circular Economy Action Plan von 2015 und 2020 unter anderem zum Ziel gesetzt, die Wirtschaft insgesamt zunehmend ressourceneffizienter zu gestalten (EC 2015, 2020a). Die Verbesserung der Kreislaufwirtschaft ist ein wichtiger Baustein dafür. 2018 wurde ein Überwachungsrahmen veröffentlicht, mit dem Stand und Veränderung der Kreislaufwirtschaft gesamtwirtschaftlich gemessen werden sollen (EC 2018b). Der Überwachungsrahmen enthält insgesamt 10 Indikatoren, ein wichtiger Indikator ist die zirkuläre Nutzungsrate (Indikator 7a-b in Abbildung 8), die den Anteil der rezyklierten Materialien an allen genutzten Materialien zeigt und damit den Beitrag von Sekundärrohstoffen am gesamten Rohstoffbedarf ausdrückt.

Der Aktionsplan Kreislaufwirtschaft der Europäischen Kommission (EC 2020a) hat zum Ziel, die CMU innerhalb eines Jahrzehnts zu verdoppeln. Das zweijährliche Monitoring soll zeigen,

ob und inwieweit sich die Entwicklungen innerhalb der EU in die richtige Richtung bewegen. Das heißt, wenn die zirkuläre Nutzungsrate steigt, entwickelt sich die EU zunehmend zu einer Kreislaufwirtschaft. In 2019 lag die zirkuläre Nutzungsrate der EU-27 bei 11,9 %, dies ist eine Verbesserung gegenüber 2004 mit 8,2 % (Eurostat 2020d) (siehe Kapitel 3.2).

Abbildung 8: Überwachungsrahmen der EU für die Kreislaufwirtschaft



Quelle: EC (2018) © Europäische Union, 1998-2020

Berechnung: Die Berechnungsvorschriften der zirkulären Nutzungsrate (CMU) sind in Eurostat (2018) festgelegt. Die Grundgleichung lautet:

$$CMU = U / M,$$

mit U = genutzte rezyklierte Abfallstoffe (circular use of materials) und M = gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung (overall material use).

Sowohl für die Erhebung von U als auch von M werden verschiedene Optionen im Handbuch von Eurostat genannt. So können beispielsweise unterschiedliche Rohstoffindikatoren für M genutzt werden, darunter der Materialkonsum mit oder ohne Verrechnung der Vorketten (DMC oder der RMC, siehe Box). Die gegenwärtig gängige Variante, die von Eurostat in aggregierter Form ausgewiesen wird, ist die Nutzung des DMC, weil die Daten für alle Mitgliedsländer verfügbar sind. Es ist ausdrücklich gewünscht, dass zukünftig der RMC als der ideale Indikator für die gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung herangezogen wird.

Als Proxy für die genutzten rezyklierten Abfallstoffe werden die Abfälle, die einem Recycling zugeführt werden, genutzt (siehe auch Kap. 3). Weiterhin können gehandelte, rezyklierte Abfälle bei der Berechnung von U unterschiedlich oder auch gar nicht einbezogen werden. Die gängige Variante berücksichtigt die Importe nicht, jedoch die Exporte, womit die Recycling-Anstrengungen der jeweiligen Länder unabhängig vom Ort der Nutzung hervorgehoben werden (Eurostat, 2018). Die Empfehlung lautet ferner, energetisch genutzte Abfälle und die Wiedernutzung von Verfüllungen (backfilling) nicht zu berücksichtigen.

Die zirkuläre Nutzungsrate kann, dem Handbuch folgend, für die Rohstoffgruppen Biomasse, Metalle, nicht-metallische Mineralien und fossile Energieträger und -materialien ausgewiesen werden. Dies sind die gängigen Rohstoffkategorien, in denen ökonomieweite Stoffflüsse dargestellt werden.

Vorteile: Die CMU ist angesichts der gegenwärtig vorliegenden Datenlage ein pragmatischer Schritt, um den Beitrag der Sekundärrohstoffe an der Gesamtrohstoffnachfrage in allen EU-Ländern vergleichbar zu messen.

Nachteile: (1) Durch die Nutzung des DMC für den Primärrohstoffverbrauch werden Importe und heimische Extraktion ungleich behandelt, mögliche Verlagerungen von (Umwelt-) Belastungen auf andere Länder werden nicht sichtbar. (2) Die CMU unterstellt, dass die rezyklierten Materialien im In- und Ausland auch tatsächlich eingesetzt werden, was nicht zwingend gegeben ist. So erhöhen beispielsweise auch exportierte Recyclingstoffe, die im Ausland unsachgemäß behandelt werden, die CMU. (3) Der Zähler ist überschätzt, da in ihn auch Sortier- und Recyclingverluste eingehen. (4) Durch die Nutzung der rezyklierten Rohstoffmengen ohne eine Umrechnung in substituierte Primärrohstoffäquivalente entsprechend der aktuell vorherrschenden Praxis bei der Berechnung werden die eingesparten Primärrohstoffe nicht adäquat erfasst und systematisch unterschätzt. (5) Die zirkuläre Nutzungsrate berücksichtigt Wiedernutzung (Reuse, Secondhandware) nicht und unterschätzt auch damit systematisch die in einer Ökonomie wieder genutzten Waren und Sekundärrohstoffe. Dieser Aspekt gilt auch für andere Kreislaufwirtschaftsindikatoren.

Der DMI bzw. DMC und der RMI bzw. RMC

Materialflüsse können für Volkswirtschaften unterschiedlich gemessen werden: So unterscheiden sich die Indikatoren einerseits darin, wie der internationale Handel berücksichtigt wird, und andererseits darin, ob die Produktionsperspektive oder die Konsumperspektive eingenommen wird. Der internationale Handel kann mit oder ohne Vorketten berechnet werden. So kann ein importiertes Stahlblech oder Auto beispielsweise mit dem Eigengewicht gemessen werden oder umgerechnet werden in die Menge Rohmaterialien (Raw material equivalents), die für die Erzeugung des Stahlblechs bzw. Autos im Ausland erforderlich waren. Die Produktionsperspektive berücksichtigt Importe und heimische Extraktion, das heißt alle Rohstoffe, die in der Volkswirtschaft verarbeitet werden. Die Konsumperspektive berücksichtigt die Rohstoffe, die in der Volkswirtschaft konsumiert werden, das sind die heimische Extraktion plus die Importe abzüglich der Exporte.

Die gesamtwirtschaftliche Menge der eingesetzten Primärrohstoffe kann somit gemäß aktuellen Standards (Eurostat 2020e) unterschiedlich gemessen werden:

- als direkter Materialinput (DMI), bestehend aus heimischer Entnahme und Importen (Importgewichte), dies entspricht der Produktionsperspektive, Handel ohne Vorketten
- als direkter Materialverbrauch (DMC), d.h. DMI abzüglich Exporte (Exportgewichte), dies entspricht der Konsumperspektive, Handel ohne Vorketten
- als Rohstoffinput (RMI), bestehend aus heimischer Entnahme und Importe (Rohmaterialäquivalente), dies entspricht der Produktionsperspektive, Handel mit Vorketten
- als Rohstoffverbrauch (RMC), d.h. RMI abzüglich Exporte (Rohmaterialäquivalente), dies entspricht der Konsumperspektive, Handel mit Vorketten

Die unterschiedlichen Indikatoren sind im folgenden Schaubild dargestellt:



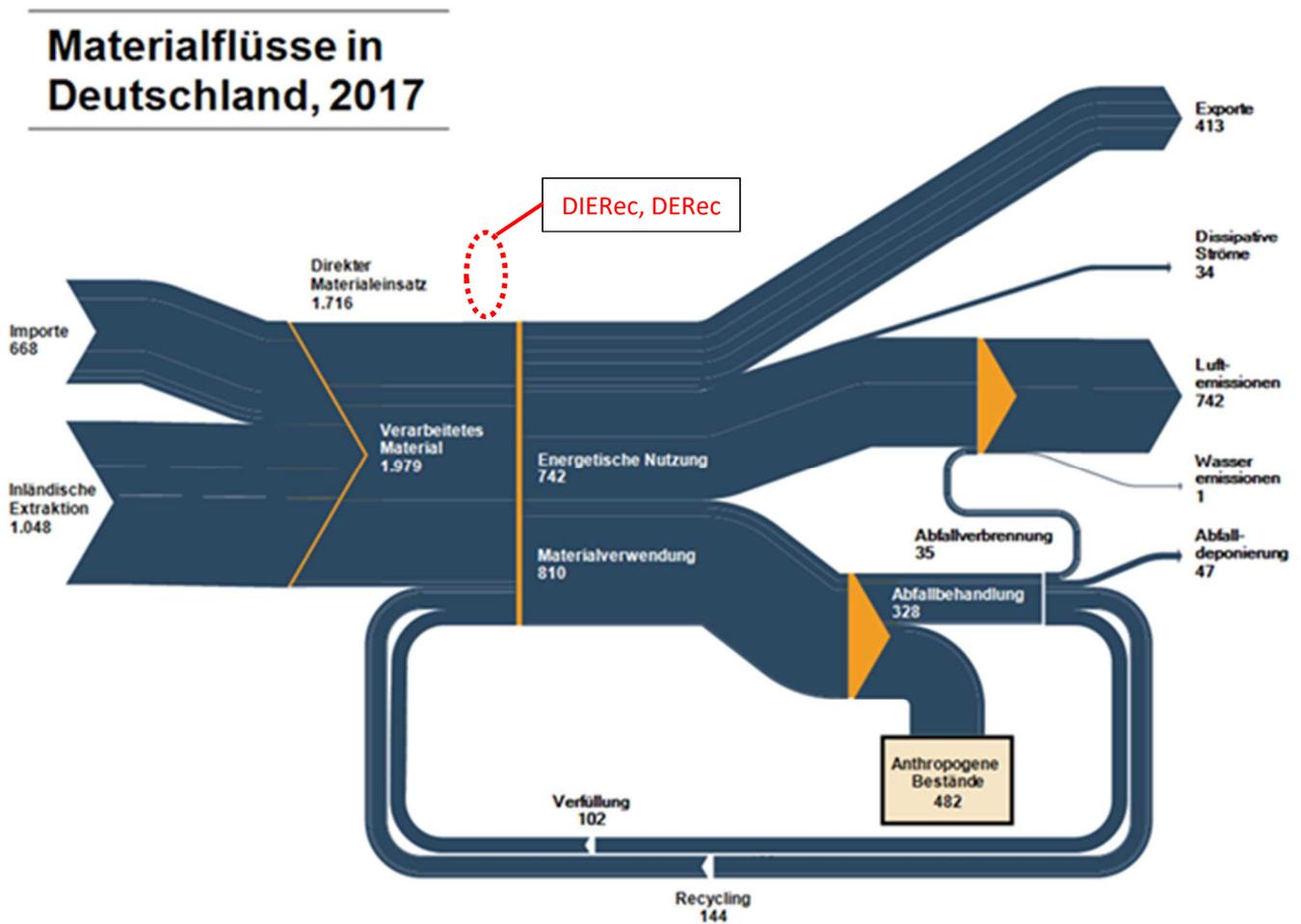
Quelle: Eigene Darstellung (Deutschlandkarte: © Free Vector Maps, Striped Candy LLC (n.d.)

2.5 DIERec und DERec

Die Indikatoren *Direkte Effekte der Verwertung* (DERec) bzw. *Direkte und indirekte Effekte der Verwertung* (DIERec) quantifizieren die theoretische Menge Primärrohstoffe, die durch den Einsatz von Rezyklaten direkt bzw. direkt und indirekt, d.h. einschließlich Vorketten, nicht in Anspruch genommen wurden.

Gesetzliche Vorgaben: Das zweite Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess II, BMU 2016) sah die Entwicklung der Indikatoren *DERec* und *DIERec* vor. Darüber hinaus sollte geprüft werden, welche Steigerungen beim *DERec/DMI* bzw. *DIERec/RMI* möglich wären. Eine konkrete Zielvorgabe für die Indikatoren wurde auch im dritten Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess III, BMU 2020b) nicht formuliert. Mit einem Monitoring der Indikatoren *DIERec* und *DERec* bzw. *DIERec/RMI* und *DERec/DMI* soll überwacht werden, ob Sekundärrohstoffe verstärkt eingesetzt werden, und dadurch der Primärmaterial- bzw. -rohstoffbedarf in Deutschland gesenkt wird.

Abbildung 9: DERec und DIERec



Quelle: eigene Darstellung

Der DERec und der DIERec wurden im Rahmen des Forschungsprojekts ReSek für 30 Rohstoffe für die Jahre 2007 und 2013 berechnet (Steger et al. 2019). Der DERec belief sich auf 222 Mio. Tonnen, der DIERec auf 493 Mio. Tonnen. Dies sind die Mengen, um die sich theoretisch der DMI (+ 13 %) bzw. der RMI (+18,5 %) erhöht hätten, wenn keine Verwertung der Abfälle stattgefunden hätte.

Sowohl DERec als auch DIERec werden nach den gängigen Rohstoffkategorien (Biomasse, Metalle, Nicht-metallische Mineralien und fossile Rohstoffe) ausgewiesen.

Berechnung: Folgende Formeln wurden genutzt (Steger et al. 2019):

$$\text{DIERec} = (\text{KRA}_{\text{Primär}} * \text{substituierte Menge}) - (\text{KRA}_{\text{Sekundär}} * \text{verwertete Sekundärrohstoffmenge})$$

$$\text{DERec} = (\text{KRA}_{\text{Primär ohne Vorkette}} * \text{substituierte Menge}) - (\text{KRA}_{\text{Sekundär ohne Vorkette}} * \text{verwertete Sekundärrohstoffmenge})$$

mit KRA = Kumulierter Rohstoffaufwand, das ist die Summe aller Rohstoffe, die bei der Produktion der Materialien bzw. Produkte eingeflossen sind.

Steger et al. (2019) entnahmen die jeweiligen verwerteten Sekundärrohstoffmengen aus den Abfallbilanzen. Die substituierten Mengen wurden für jeden Rohstoff bzw. für jede Abfallfraktion einzeln unter Hinzuziehung unterschiedlicher Quellen recherchiert und plausibilisiert. Die KRA-Koeffizienten mit bzw. ohne Vorketten wurden aus Sachbilanzen von Ökobilanzen (ecoInvent 2.2. bzw. 3.2.) entnommen.

Der DERec und der DIERec berücksichtigen stofflich und energetisch genutzte Abfälle und Nebenprodukte wie Schlacken, Hüttensand, Flugaschen oder REA-Gips.

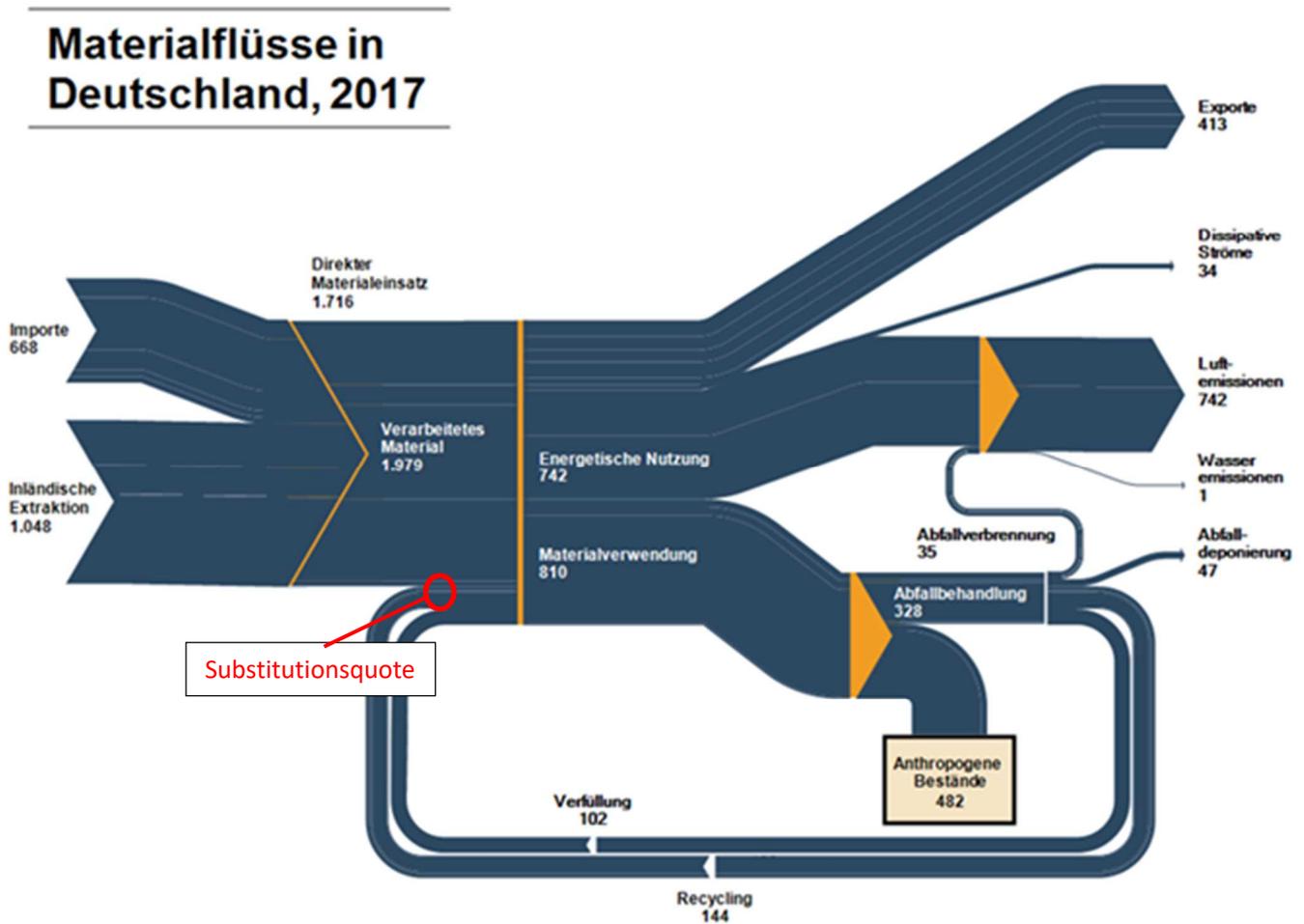
Vorteile: Der DERec bzw. der DIERec messen die Menge der Primärrohstoffe, die unter gegebenen Technologien und Produktionsprozessen erforderlich gewesen wären, um den (durch die Sekundärrohstoffe eingesparten) zusätzlichen Rohstoffinput in Deutschland zu befriedigen. Im Gegensatz zur CMU integrieren die Indikatoren auch (theoretisch) eingesparte Energierohstoffe. Insbesondere der DIERec ist interessant, weil er die eingesparte Primärrohstoffmenge einschließlich der Vorketten ausweist. Die Indikatoren integrieren (theoretisch und entsprechend der Datenlage) teilweise bzw. weitmöglich ReUse, Secondhand-Nutzung und inner-industrielle Wiedernutzung, die in anderen Indikatoren nicht berücksichtigt werden.

Nachteile: (1) Der Indikator ist gegenwärtig noch nicht standardisiert. Die Ergebnisse hängen zu einem großen Anteil von angenommenen Substitutionsmengen und vor allem von KRA-Koeffizienten ab, die nicht durch amtliche Statistiken abgesichert sind. Im Detail sind bei vielen Rechnungen Importe und andere Stoffflüsse aufgrund von Datenlücken unberücksichtigt geblieben. (2) Die Nutzung von LCA-Datensätzen für die Berechnungen der KRAs ist konzeptionell und methodisch nicht konsistent mit den Erhebungen der ökonomieweiten Stoffflüsse. (3) ReUse und Secondhand sind unter anderem aufgrund von Datenlücken nicht vollständig erfasst, wodurch die Indikatoren die eingesparten (theoretischen) Primärrohstoffe unterschätzt. (4) Der DERec und der DIERec drücken keine rein stoffliche Kreislaufwirtschaft aus, da die Substitution von Energierohstoffen durch Abfallverbrennung gleichermaßen wie die stoffliche Nutzung berücksichtigt wird. (5) Weder der DERec noch der DIERec berücksichtigen die Konsumperspektive.

2.6 Gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote

Die Substitutionsquote misst die eingesetzte Menge Sekundärrohstoffe an der insgesamt nachgefragten Menge an Primär- und Sekundärrohstoffen. Die Berechnung kann für Volkswirtschaften, für Rohstoffe und/oder auf Produktebene erfolgen, die oben beschriebene Rezyklateinsatzquote entspricht einer Substitutionsquote auf Produktebene. Im Folgenden wird der Variante der gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquote nachgegangen.

Abbildung 10: Gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote



Quelle: eigene Darstellung

Gesetzliche Vorgaben: Es gibt gegenwärtig keine Vorgabe. Eine Substitutionsquote wird von verschiedenen Akteuren empfohlen, darunter von der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (Ressourcenkommission am Umweltbundesamt 2019). Die in ProgRes III genannte Quote des DERec/DMC bzw. DIERec/RMI kommt einer Substitutionsquote sehr nahe, misst aber die eingesetzte Menge Sekundärrohstoffe nur an der Menge der Primärrohstoffe. Ein weiteres Beispiel ist die sogenannte Zirkularitätsquote im Projekt RESCUE, in der die genutzten Sekundärrohstoffe (umgerechnet in RME) bezogen auf den $RMC_{\text{primär+sekundär}}$ gemessen wurden.

Berechnung: Es gibt keine konkrete Berechnungsvorschrift, grundsätzlich gilt:

Substitutionsquote = eingesetzte Sekundärrohstoffe / Menge Primär- und Sekundärrohstoffe

Die gesamtwirtschaftliche Menge der eingesetzten Primärrohstoffe kann gemäß aktuellen Standards (Eurostat 2020e) unterschiedlich gemessen werden (siehe auch Box in Kapitel 2.4):

- als direkter Materialinput (DMI), bestehend aus heimischer Entnahme und Importen (Importgewichte)
- als direkter Materialverbrauch (DMC), d.h. DMI abzüglich Exporte (Exportgewichte)
- als Rohstoffinput (RMI), bestehend aus heimischer Entnahme und Importe (Rohmaterialäquivalente)
- als Rohstoffverbrauch (RMC), d.h. RMI abzüglich Exporte (Rohmaterialäquivalente)

Da der DMI und der DMC den internationalen Handel und die heimischen Entnahmen unterschiedlich gewichten, entsteht ein Ungleichgewicht. Daher wird die Nutzung des RMI und des RMC von Fachleuten normalerweise bevorzugt, auch wenn die Rechnungen komplexer sind und modellgestützt durchgeführt werden müssen. Werden nun Sekundärrohstoffe bei der Gesamtmenge der genutzten Rohstoffe zusätzlich berücksichtigt, können die genutzten Sekundärrohstoffe mit ihrem Eigengewicht einfließen wie bei der CMU (siehe Kap. 2.4) oder wie beim DIERec (siehe Kap. 2.5), oder sie können wie beim Vorgehen im Projekt RESCUE umgerechnet werden in die Primärrohstoffmenge, die durch den Einsatz von Sekundärrohstoffmengen eingespart wird. Erst die Umrechnung gibt eine Orientierung über den tatsächlichen Substitutionserfolg des Sekundärrohstoffeinsatzes und ist aus unserer Sicht daher zu bevorzugen.

Ein konzeptioneller Unterschied besteht zwischen dem DIERec und der Zirkularitätsquote in RESCUE: die Primärmaterialien, die für das Recycling der Abfälle aufgewendet wurden, sind im DIERec enthalten, bei der Zirkularitätsquote im RESCUE-Projekt wurden sie ausschließlich bei den Primärmaterialien mitgezählt.

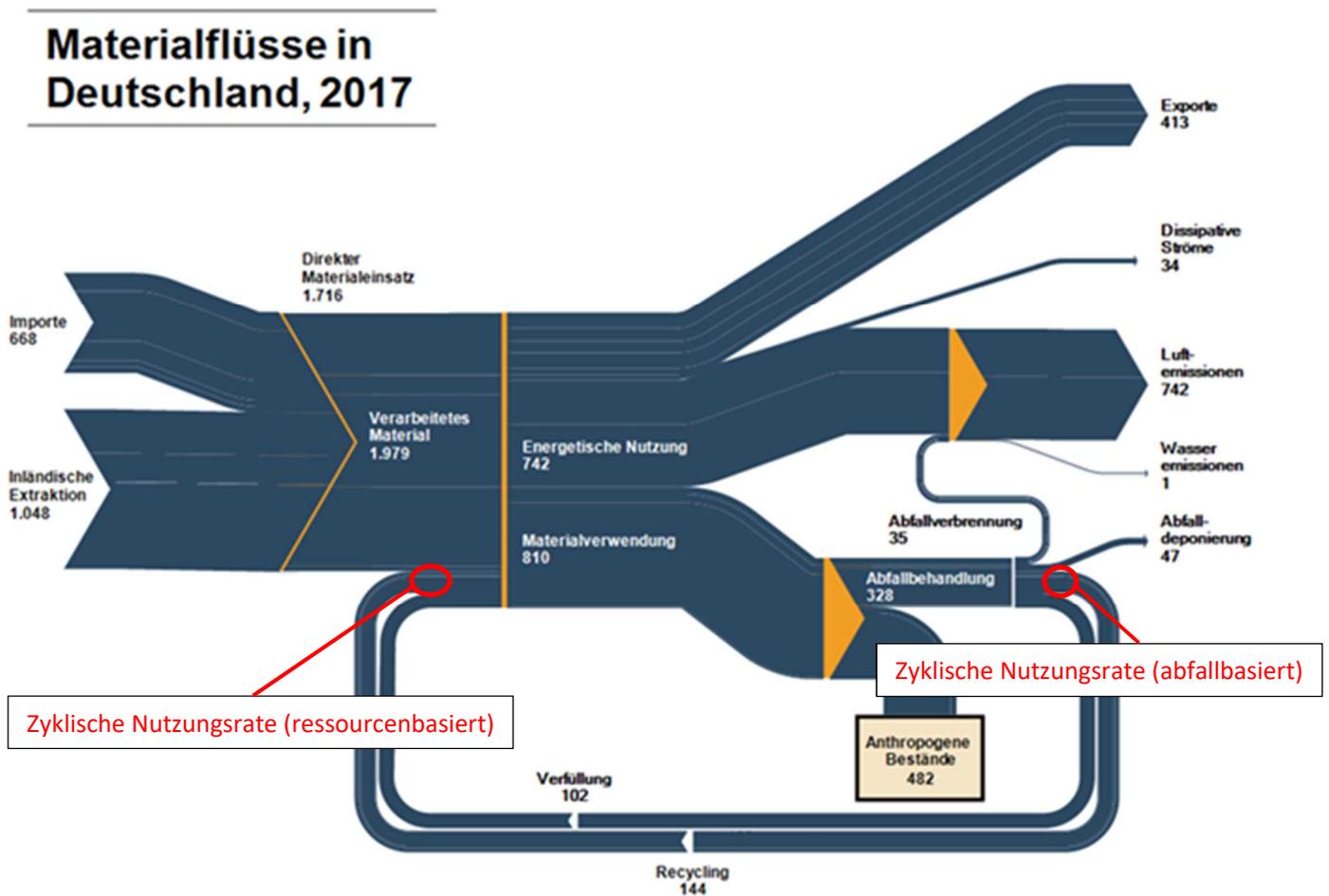
Vorteile: Die Substitutionsquote erfasst die tatsächliche Menge der Sekundärrohstoffe, die in den Kreislauf wieder eingespeist werden und mit denen Primärrohstoffe geschont werden. Überschätzungen werden dadurch vermieden (Ressourcenkommission am Umweltbundesamt 2019).

Nachteile und Limitierungen: (1) Effekte durch Langlebigkeit und Wiedernutzung werden auch durch diesen Indikator nicht abgebildet. Die empirische Datenbasis ist noch unzureichend, so dass der Indikator gegenwärtig noch nicht ausreichend belastbar ausgewiesen werden kann (Ressourcenkommission am Umweltbundesamt 2019). (2) Es liegt gegenwärtig noch kein Standard für die Erhebung vor, dieser wäre zu entwickeln. (3) Es bestehen Datenlücken, die systematisch identifiziert werden müssen und für die Lösungen gefunden werden müssen (siehe auch Kapitel 4.2).

2.7 Die Zyklische Nutzungsrate in Japan

Die ressourcenbasierte zyklische Nutzungsrate umfasst die Menge der wiederverwerteten Abfälle gemessen am Materialinput plus wiederverwertete Abfälle. Sie entspricht damit der CMU, nur, dass nicht der konsumbezogene DMC, sondern der produktionsbezogene DMI als Indikator für die Menge der genutzten Primärmaterialien genommen wird. Sie wird ergänzt durch einen Indikator zum Recycling von Abfällen.

Abbildung 11: Zyklische Nutzungsrate in Japan



Quelle: eigene Darstellung

Gesetzliche Vorgaben: In Japan wird der Indikator der zyklischen Nutzungsrate verwendet. Dieser wird aufgespalten in eine ressourcenbasierte und eine abfallbasierte Nutzungsrate. Für beiden Nutzungsraten wurden auch unterschiedliche politische Zielsetzungen bis zum Jahr 2025 im nationalen 4th Fundamental Plan for Establishing a Sound Material-Cycle Society festgelegt:

- I. Ressourcenbasiert 18 % (2015 bei 16 %)
- II. Abfallbasiert 47 % (2015 bei 44 %) (Ministry of Environment Japan 2018)

Berechnung: Die zyklische Nutzungsrate beschreibt folgende Verhältnisse:

- a) Die stofflich wiederverwertete Abfallmenge (zyklische Nutzung) zum Materialinput (DMI) plus wiederverwertete Abfälle (resource-based)
- b) Die Menge der zyklischen Nutzung zum Abfallaufkommen (waste-based)

Die insgesamt eingesetzte Menge an Materialien umfasst den DMI (Direct Material Input) zusammen mit der Menge der zyklischen Nutzung.

Die Menge der zyklischen Nutzung inkludiert wiederverwendete und rezyklierte Abfälle (Japan Industrial Waste Information Center 2018; Ministry of Environment Japan 2018).

Vorteile: Vorteile ergeben sich durch den Indikator der zyklischen Nutzungsrate (ressourcenbasiert) dadurch, dass der Indikator den Anteil der zyklischen Nutzung am Gesamtinput in die Wirtschaft und Gesellschaft repräsentiert (Yolin, Christine 2015).

Nachteile und Limitierungen: Ein Nachteil des Indikators ergibt sich dadurch, dass keine Aussage über die Art der Nutzung getroffen werden kann. Er liefert beispielsweise keine Aussage darüber, wie groß der Anteil der zyklischen Nutzungsrate ist, der einem Downcycling (minderwertigere Nutzung im Vergleich zur Nutzung des Primärrohstoffs) unterzogen wird. Durch die Nutzung des DMI im Nenner werden gehandelte Produkte anders als die heimische Entnahme berücksichtigt.

Limitierungen ergeben sich ferner durch praktische Datenlücken in Bezug auf den Umfang der zyklischen Nutzung. Außerdem fördert der Indikator keine Suffizienz im Sinne der Abfallvermeidung, sondern schafft nur Effizienz im Umgang mit Abfällen (Hiratsuka, Jiro 2004).

2.8 Zusammenfassung

Die vorgestellten Indikatoren zeigen, wie unterschiedlich eine Kreislaufführung sowohl von Produkten, Rohstoffen und Abfallfraktionen als auch von einer Volkswirtschaft gemessen werden kann. Recyclingquoten zeigen beispielsweise den Beitrag der Kreislaufwirtschaft bei der Reduktion der Abfallmengen. Allerdings misst dieser Indikator nicht die Höhe der Substitution von Primärmaterialien. Dies wird durch Rezyklateinsatzquoten bzw. Substitutionsquoten beleuchtet. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden diese Indikatoren, wenn überhaupt, jedoch nur für Monitoringzwecke genutzt, und nicht für politische Zielsetzungen.

Die europäische CMU oder auch die zyklische Nutzungsrate in Japan gehen in diese Richtung. Aber die CMU misst nicht die tatsächlich eingesetzte Sekundärmaterialmenge, sondern nutzt die dem Recycling zugeführte Menge als Proxy. Sowohl Japan als auch in der EU gibt es ein konkretes gesamtwirtschaftliches Ziel.

Der in Deutschland entwickelte DIERec bzw. DERec ist eine theoretische Größe, mit der die substituierte Primärrohstoffmenge grundsätzlich gut quantifiziert werden kann. Die gegenwärtige methodische Umsetzung erlaubt bislang jedoch nur näherungsweise Vergleiche mit der Menge der in Deutschland eingesetzten Primärmaterialien. Methodisch konsistente Berechnungen von gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquoten liegen aus Forschungsprojekten vor. Die aktuell vorliegenden Berechnungen enthalten empirische Lücken.

3 Die Circular Material Use Rate von Deutschland

3.1 Methodik zur Berechnung der CMU

Nachdem die zirkuläre Materialnutzungsrate (CMU) in Kapitel 2.5 eingeführt wurde, wird in diesem Kapitel die Vorgehensweise zur Berechnung der CMU für Deutschland detailliert erläutert. Die Ergebnisse werden vorgestellt und zur Einordnung mit den Ergebnissen für die EU verglichen.

Die CMU ist definiert als das Verhältnis der im Kreislauf geführten Materialien zur gesamten Rohstoffnutzung. Sowohl der Zähler als auch der Nenner können auf verschiedene Arten berechnet werden. Im Leitfaden von Eurostat (2018b) wird vorgeschlagen, für den Zähler die Menge der dem stofflichen Recycling zugeführten Abfälle abzüglich der Abfallimporte und zuzüglich der Abfallexporte als Proxy zu verwenden. Flüsse, die innerhalb eines Unternehmens, von einem Unternehmen außerhalb des Abfallsektors oder von privaten Haushalten aufbereitet werden, werden damit nicht erfasst. Verfüllung und energetische Verwertung werden entsprechend dieser Definition ebenfalls ausgeschlossen.

Verfüllung

Verfüllung ist ein bedeutender Verwertungsweg für nichtmetallische Mineralien und bezieht sich auf die Nutzung der Mineralien zur dauerhaften Füllung von Gruben, Tagebauten und Brüchen, im Landschaftsbau und zum Deponiebau. In Abgrenzung zum Recycling ist hier keine umfangreiche Aufbereitung der Materialien notwendig, das verfüllte Material muss aber die Nutzung von Primärmaterial ersetzen (Eurostat n.d.). Die sogenannte Liniendeponierung, d.h. die Entsorgung von Material durch Schaffung von nicht notwendigen Dämmen oder Lärmschutzwänden, gehört damit nicht dazu. In der Praxis ist diese Unterscheidung allerdings häufig schwierig. Ein tatsächliches stoffliches Recycling ist daher einer Verfüllung vorzuziehen.

Für den Nenner stehen zwei Optionen zur Verfügung: Es kann entweder der inländische Rohstoffkonsum (DMC) oder der Gesamtrohstoffkonsum (RMC) verwendet werden. Ersterer liegt für alle EU-Länder vor und wird daher von Eurostat empfohlen. Allerdings berücksichtigt der DMC Importe und Exporte nur mit ihrem Eigengewicht, während im Inland produzierte Güter samt ihrer Vorkette in den Indikator eingehen. Damit wird der Rohstoffaufwand der Im- und Exporte unterschätzt. Daher berechnen wir den Indikator in einer zweiten Variante auch mit dem RMC, bei welchem die Handelsströme in Rohstoffäquivalente umgerechnet werden, d.h. der Rohstoffrucksack der importierten und exportierten Güter wird einbezogen. Der RMC kann mit dem Eurostat Country Tool (Schoer et al. 2020) für einzelne Länder berechnet werden.

Berechnung des RMC mit dem Eurostat Country Tool (Schoer et al. 2020)

Das Eurostat Country Tool wurde u.a. von Karl Schoer und ifeu im Auftrag von Eurostat entwickelt. Mit Hilfe des Tools können EU-Länder ihre Importe und Exporte in Rohstoff-äquivalente umrechnen und damit ihren RMC berechnen. Methodisch baut das Tool auf dem EU RME Modell auf, mit welchem der RMC der EU berechnet wird. Dafür wird die EU-Input-Output-Tabelle, d.h. eine Matrix der Verflechtungen zwischen 64 Sektoren und der Endnachfrage, in 182 Sektoren disaggregiert und teilweise in physische Einheiten umgerechnet. Basierend auf Informationen zur Nutzung von Rohstoffen bei der innereuropäischen Produktion von Gütern wird der Rohstoffverbrauch der einzelnen Sektoren ermittelt. Daraus lassen sich Koeffizienten für die einzelnen Sektoren und Rohstoffe berechnen, die mit Hilfe von Informationen u.a. zu durchschnittlichen Erzgehalten, Energiemixen und Recyclingraten für Importe und Exporte angepasst werden. Die auf diese Weise ermittelten Koeffizienten können mit dem Eurostat Country Tool auf die Ausgangsdaten der einzelnen EU-Länder angewandt werden. Das Ergebnis sind Angaben zu den Rohstoffäquivalenten der Importe und Exporte für 52 verschiedene Materialien.

Damit der Wert der CMU 100 % nicht überschreiten kann, wird die Menge der recycelten Abfälle im Nenner addiert. Die Formel für die Berechnung ist damit die folgende; die Benennung wurde von Eurostat (2018b) übernommen:

$$CMU = \frac{\text{recycelte Abfälle (abzgl. Abfallimporte, inkl. Abfallexporte)}}{\text{gesamte Rohstoffnutzung}}$$

$$= \frac{RCV_R - IMP_w + EXP_w}{DMC + RCV_R - IMP_w + EXP_w}$$

RCV_R : Menge der Abfälle, die der stofflichen Verwertung zugeführt werden (Verfüllung und thermische Verwertung zählen nicht dazu). Der Wert wird aus Werten der EU-Abfallstatistik berechnet, die nur für jedes zweite Jahr verfügbar sind. Die Werte für die Jahre dazwischen werden daher geschätzt. Die Abfallströme werden mit Hilfe eines Konversionsschlüssels den einzelnen Materialgruppen zugeordnet.

IMP_w bzw. EXP_w : Menge der importierten bzw. exportierten Abfälle zur Verwertung. Die Werte stammen aus der EU-Handelsstatistik; 131 Zollcodes werden je einer der vier Materialgruppen zugeordnet.

DMC : Inländischer Rohstoffkonsum mit Berücksichtigung der Importe und Exporte ohne die Vorketten. Die Werte stammen aus der EU-Materialflusststatistik.

RMC : Gesamtrohstoffkonsum mit Berücksichtigung der Importe und Exporte inklusive der Vorketten. Die Werte werden mit Hilfe des Eurostat Country Tools (Schoer et al. 2020) berechnet. Der Wert kann alternativ zum DMC in der Formel eingesetzt werden.

$$CMU_{RMC} = \frac{RCV_R - IMP_w + EXP_w}{RMC + RCV_R - IMP_w + EXP_w}$$

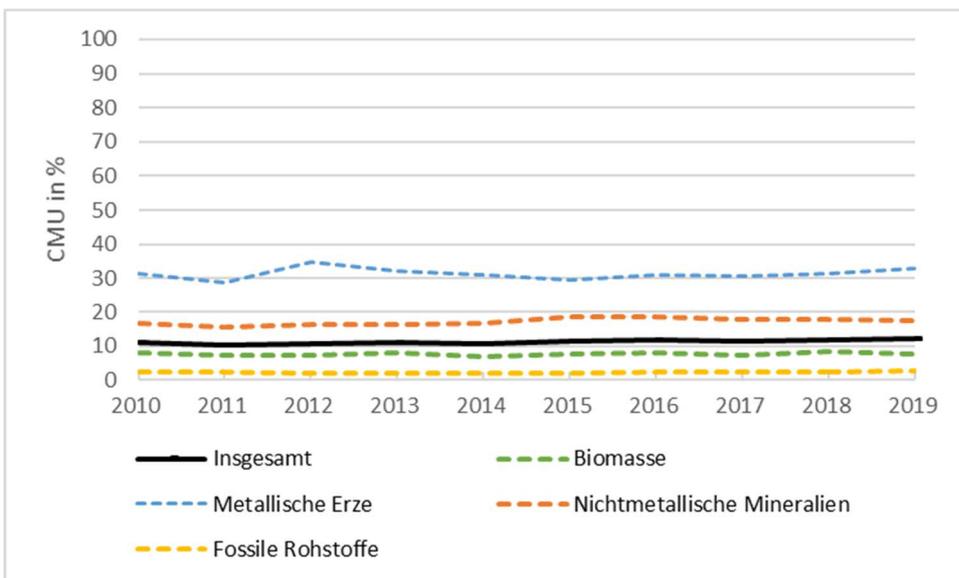
Wichtig ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Menge der recycelten und gehandelten Abfälle mit ihrem Eigengewicht vor der Abfallbehandlung in den Indikator eingehen. Dadurch kommt es zu Verzerrungen in zwei Richtungen:

- Einerseits wird die Menge an im Kreislauf geführten Rohstoffen überschätzt, da die Verluste beim Recycling nicht eingerechnet werden.
- Andererseits wird die durch Recycling eingesparte Menge an Rohstoffen unterschätzt, da die recycelten Abfälle nicht in Primärrohstoffäquivalente umgerechnet werden. (Eine Umrechnung wäre zwar möglich, ist aber mit einem Aufwand verbunden, da die Umrechnungskoeffizienten konsistent ermittelt werden müssen.)
- Zudem werden Recycling und Wiedernutzung von Akteuren außerhalb des Abfallsektors im Zähler nicht berücksichtigt, da hierzu keine ausreichenden Daten vorliegen. Indirekt gehen sie in den Indikator ein, da durch sie der Primärrohstoffbedarf und damit der DMC bzw. RMC sinken.

3.2 Ergebnisse

Die durchschnittliche CMU in Deutschland ist zwischen 2010 und 2019 von 11 % auf 12 % angestiegen (s. Tabelle 1). Insgesamt ist die Entwicklung relativ konstant mit nur sehr geringen Ausschlägen (s. Abbildung 12). Die Werte unterscheiden sich sehr stark für die einzelnen Materialgruppen. Für fossile Rohstoffe, die überwiegend verbrannt werden, liegt die CMU mit gut 2 % am niedrigsten. Für Metalle, die sehr gut recycelt werden können, ist sie mit knapp einem Drittel am höchsten.

Abbildung 12: CMU in Deutschland, Variante 1 (Berechnung mit DMC)



Quelle: Eigene Berechnung

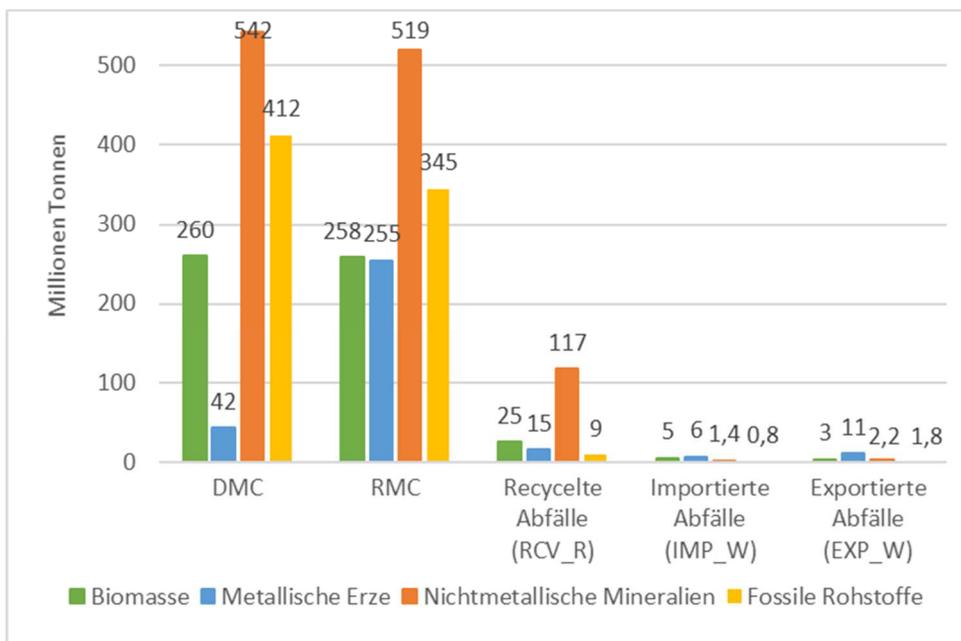
Tabelle 1: CMU in Deutschland, Variante 1 (Berechnung mit DMC)

CMU in %	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Insgesamt¹	11,0	10,3	10,7	10,9	10,8	11,5	11,6	11,4	11,9	12,0
Biomasse	8,1	7,3	7,3	7,9	6,7	7,7	7,9	7,2	8,2	7,6
Metallische Erze	31,5	28,8	34,7	32,3	31,0	29,6	30,9	30,6	31,5	32,9
Nichtmetallische Mineralien	16,6	15,4	16,2	16,3	16,7	18,6	18,3	17,8	17,8	17,5
Fossile Rohstoffe	2,3	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,5

Quelle: Eigene Berechnung, *kursiv*: Schätzung recycelten Abfallmenge als Mittelwert des vorherigen und des nächsten Jahres, da die Abfalldaten nur für gerade Jahre ermittelt werden

Betrachtet man die einzelnen Komponenten der CMU (Abbildung 13), fällt auf, dass der Handel mit recycelten Abfällen insgesamt einen recht kleinen Anteil ausmacht. Bei den nichtmetallischen Mineralien liegt der Anteil der gehandelten Abfälle am Aufkommen in Deutschland mit 1-2 % am niedrigsten, bei den Metallschrotten, die in größerem Maße importiert und exportiert werden, mit etwa 40 % bzw. 73 % am höchsten.

Abbildung 13: Komponenten der CMU (2018) im Vergleich



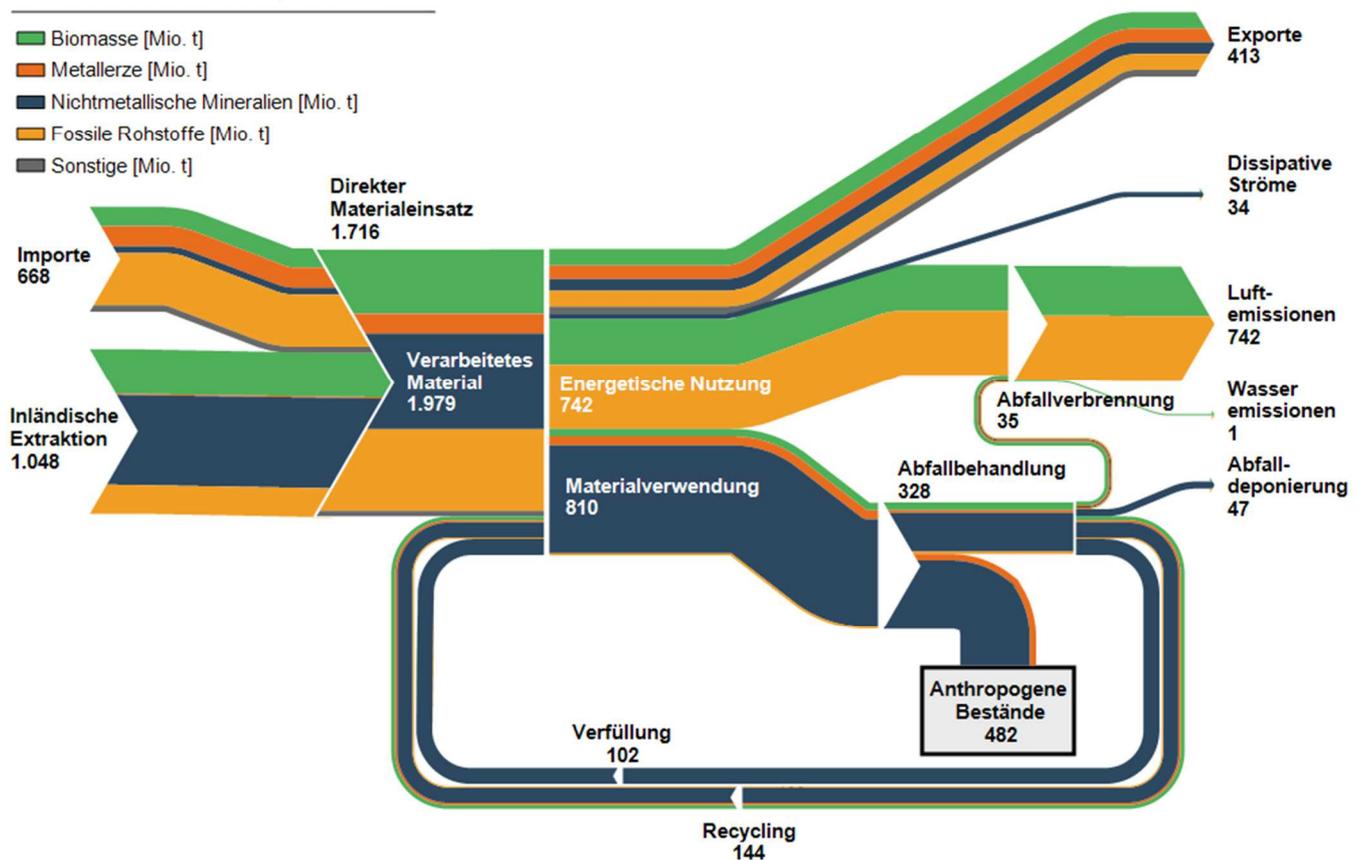
Quelle: Eigene Berechnung

¹ Die Abweichungen bei der ersten Kommastrichstelle zum Eurostat Datensatz "cei_srm020" (https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm030/default/table?lang=de) kommen durch Unterschiede bei der Rundung zustande.

Einen Überblick über die Materialflüsse in Deutschland zeigt das Sankey-Diagramm (s. Abbildung 14), welches die Materialflüsse in Deutschland (ohne eine Umrechnung der Importe und Exporte in Rohstoffäquivalente) darstellt. Es wird deutlich, dass die stofflich genutzten Flüsse (Materialverwendung, Recycling, Verfüllung) sehr stark durch die nichtmetallischen Mineralien dominiert werden. Bei den Im- und Exporten dagegen spielen die nichtmetallischen Mineralien eine kleinere Rolle. Die Importe werden bei einer Betrachtung der reinen Massenflüsse von den fossilen Rohstoffen dominiert. Es fällt zudem auf, dass neben dem Recycling die Verfüllung mit 102 Mio. t einen relevanten Strom der Wiederverwertung darstellt.

Abbildung 14: Sankey-Diagramm der Materialflüsse in Deutschland im Jahr 2017 mit Handelsströmen in Masse

Materialflüsse in Deutschland, 2017

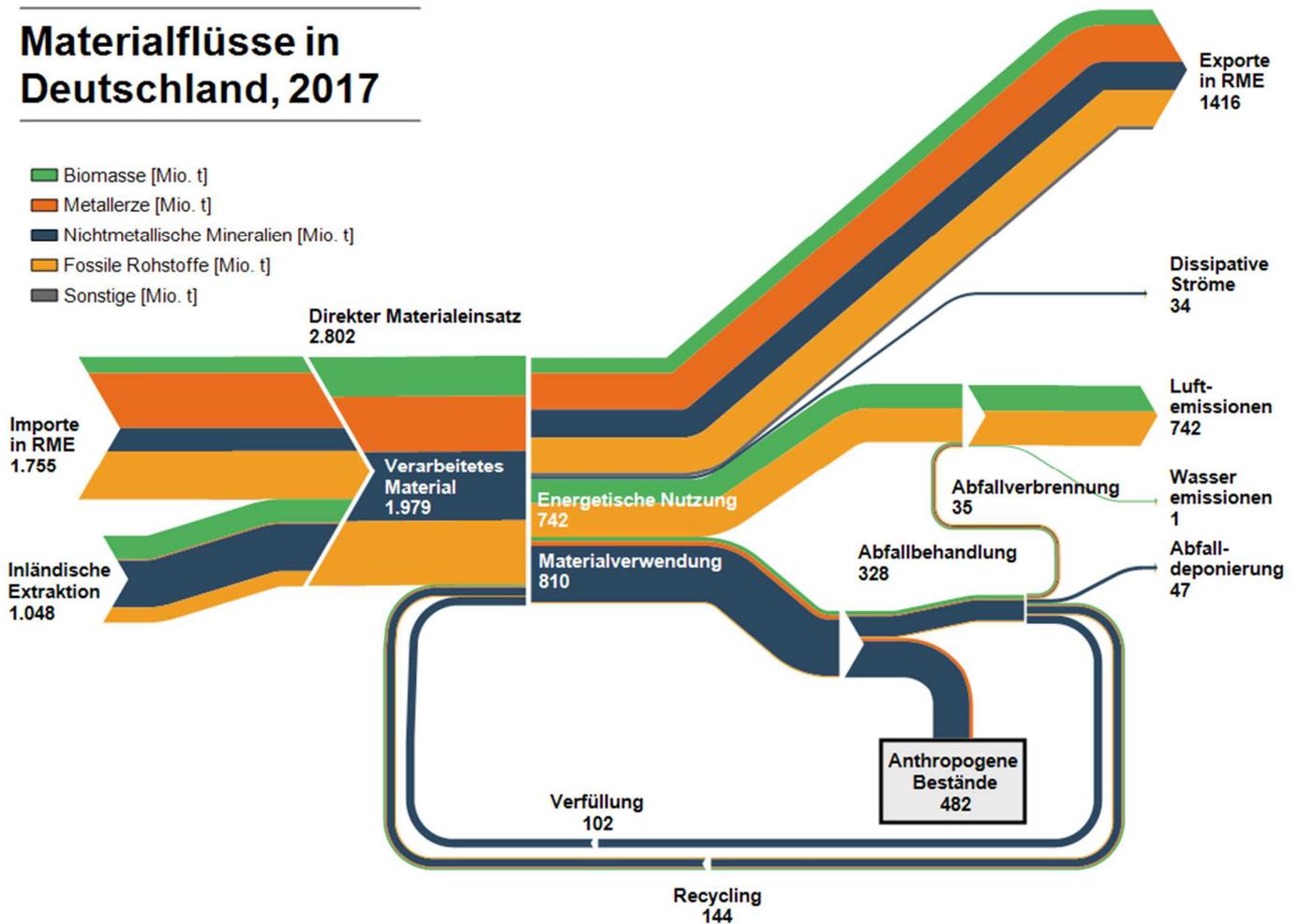


Quellen: Eigene Illustration und Berechnung mit Daten von Eurostat (env_ac_mfa, env_ac_sd, env_wassd); einzelne Werte können sich von den Werten zur Berechnung der CMU unterscheiden, da die Berechnungsvorschriften von Eurostat für die beiden Datensätze leicht voneinander abweichen. Abweichungen bei den Summen kommen durch sonstige Ströme zustande, bei denen nicht für alle Indikatoren Daten vorliegen.

Betrachtet man im Vergleich dazu das Sankey-Diagramm mit Importen und Exporten, die in Rohstoffäquivalente (RME) umgerechnet sind (s. Abbildung 15), fällt sofort ins Auge, dass die Metallerze sowohl bei Im- und Exporten als auch beim Materialeinsatz eine deutlich prominentere Rolle einnehmen. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Vorkette der

Metalle im Vergleich zu den anderen Materialgruppen einen deutlich höheren Materialeinsatz erfordert.

Abbildung 15: Sankey-Diagramm der Materialflüsse in Deutschland im Jahr 2017 mit Handelsströmen in Rohstoffäquivalenten



Quellen: Eigene Illustration und Berechnung mit Daten von Eurostat (env_ac_mfa, env_ac_sd, env_wassd) und mit Hilfe des Eurostat Country Tools.

Diese Verschiebung zwischen den Materialgruppen schlägt sich auch bei der Berechnung der CMU mit Hilfe des RMC nieder. Obwohl der Gesamtwert der CMU konstant nahe 11 % liegt, ist eine deutliche Veränderung bei den metallischen Erzen zu beobachten. Der Wert liegt um etwa 20 %-Punkte niedriger als bei der Berechnung nach Variante 1. Dies wird durch leichte Anstiege bei den anderen Materialgruppen ausgeglichen. Im Zeitraum von 2010-2018 ist kein Anstieg zu verzeichnen (s. Tabelle 2).

Um eine Aussage darüber zu erhalten, welche Primärrohstoffmenge durch die Nutzung von Sekundärmetallen aus dem Abfallsektor eingespart wird, müsste man die recycelte Menge in Primärrohstoffäquivalente umrechnen.

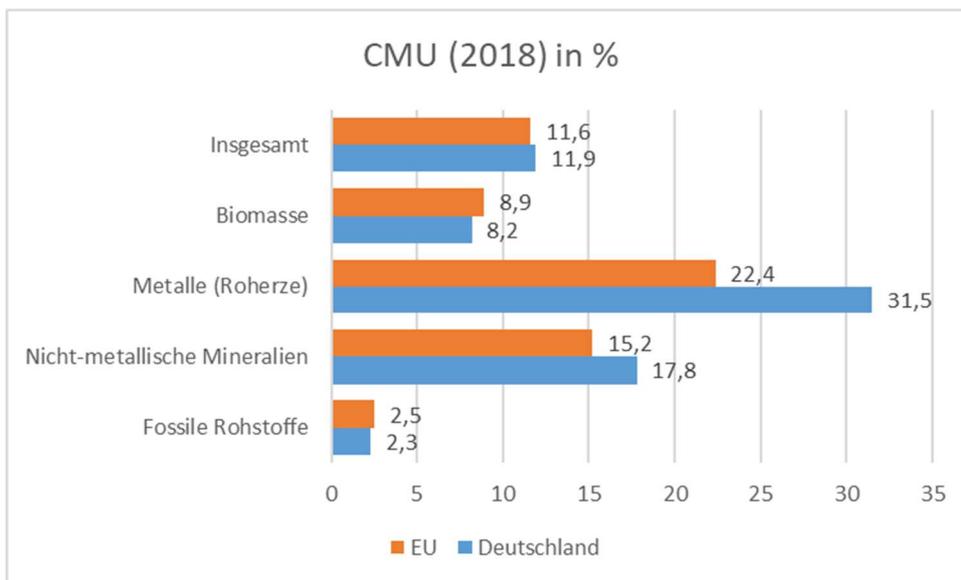
Tabelle 2: CMU in Deutschland, Variante 2 (Berechnung mit RMC)

CMU in %	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Insgesamt	11,1	<i>10,4</i>	11,2	<i>11,1</i>	11,0	<i>11,5</i>	11,6	<i>10,9</i>	11,0
Biomasse	8,2	<i>7,6</i>	7,7	<i>8,2</i>	7,0	<i>8,0</i>	8,0	<i>7,4</i>	8,2
Metallische Erze	9,8	<i>9,2</i>	12,9	<i>11,4</i>	10,4	<i>8,7</i>	9,4	<i>7,6</i>	7,1
Nichtmetallische Mineralien	17,6	<i>16,3</i>	17,1	<i>17,1</i>	17,5	<i>19,5</i>	19,2	<i>18,6</i>	18,5
Fossile Rohstoffe	2,8	<i>2,7</i>	2,7	<i>2,6</i>	2,8	<i>2,8</i>	2,8	<i>2,7</i>	2,7

Quelle: Eigene Berechnung; *kursiv*: Schätzung recycelten Abfallmenge als Mittelwert des vorherigen und des nächsten Jahres, da die Abfalldaten nur für gerade Jahre ermittelt werden

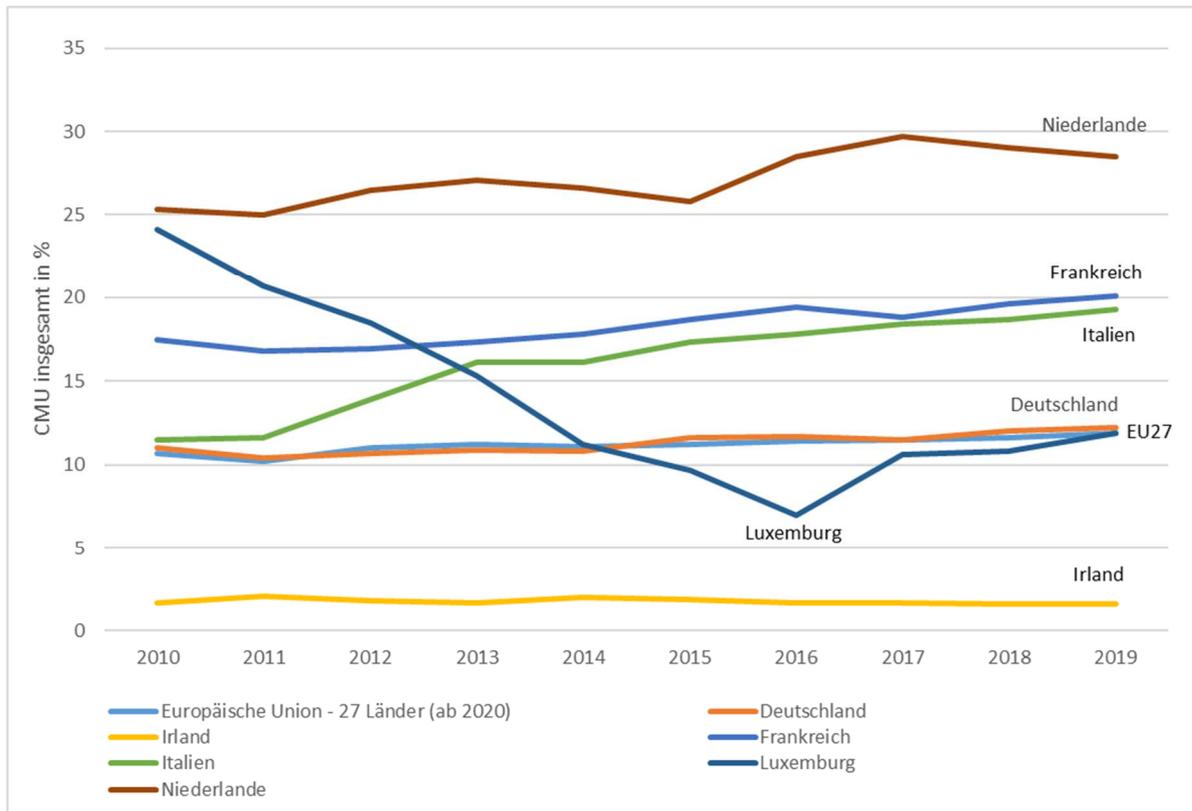
Da die Werte für die anderen EU-Länder nur basierend auf dem DMC vorhanden sind, werden für den Vergleich die Werte berechnet mit dem DMC herangezogen. Die Werte für Deutschland liegen sehr nahe am EU-Durchschnitt (Abbildung 16). Nur der Wert für metallische Erze liegt in Deutschland deutlich höher.

Abbildung 16: CMU (2018) in Deutschland und der EU im Vergleich (Berechnung mit Variante 1)



Quelle: Eigene Berechnung für Deutschland, Eurostat für die EU

Abbildung 17: CMU (insgesamt) verschiedener EU-Länder im Zeitverlauf (berechnet nach Variante 1)



Quelle: Eurostat¹

Auch wenn man den Zeitverlauf (s. Abbildung 17) betrachtet, liegen die Werte für Deutschland sehr nah am EU-Durchschnitt. Die Varianz in den absoluten Werten und im Trend zwischen den einzelnen EU-Ländern ist sehr hoch. So hat Irland beispielsweise eine CMU von knapp 2 %, während der Wert in den Niederlanden bei über 28 % liegt. In Italien ist der Wert von 11,5 % auf 19,3 % angestiegen, gleichzeitig ist der Wert für Luxemburg im gleichen Zeitraum von 24,1 % auf 11,9 % gefallen.

Diese Varianz ist allerdings nicht nur durch Unterschiede bei Rohstoffkonsum und Abfallmanagement zu erklären, sondern auch durch Unterschiede bei der Erfassung und der Zuordnung von Abfällen. So ordnen die Niederlande beispielsweise Verfüllung dem stofflichen Recycling zu, was natürlich zu einem deutlichen Anstieg der CMU führt. Damit sind Aussagen über die Unterschiede der absoluten Werte nur mit großer Vorsicht zu treffen, bzw. müssen für aussagekräftige Vergleiche zusätzliche Quellen hinzugezogen werden.

Trotz dessen ist bei den Trends erkennbar, dass Deutschland im Gegensatz zu anderen Ländern in den letzten Jahren keine Fortschritte bei der Erhöhung der CMU gemacht hat.

¹ URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur/default/table?lang=de

3.3 Steigerungspotenziale

Die CMU kann auf zwei Arten erhöht werden: über die Erhöhung der wiederverwerteten Mengen (Zähler) oder über eine Reduktion der genutzten Gesamtmenge (Nenner). Zunächst liegt es nahe, das Recycling, d.h. die wiederverwertete Menge $RCV_R - IMP_w + EXP_w$ zu erhöhen. Die ersten zwei Kapitel untersuchen das Potenzial, das sich 1) theoretisch ergibt, wenn alle Abfälle recycelt werden könnten und würden, und das sich 2) durch die Ausschöpfung aktuell bekannter technischer Potenziale ergibt. Die zweite Möglichkeit, die CMU zu erhöhen, besteht darin, die Menge der genutzten Rohstoffe (DMC oder RMC) zu reduzieren. Darauf wird im dritten und vierten Kapitel detailliert eingegangen, indem zunächst der Einfluss der Energiewende und im Anschluss der Einfluss weiterer Potenziale untersucht wird.

3.3.1 Theoretische Steigerungspotenziale durch vollständiges Recycling der Abfälle

Um das maximale theoretische Potenzial zu ermitteln, das das Recycling bietet, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass aller Abfall dem Recycling zugeführt wird, anstatt energetisch verwertet, verfüllt oder deponiert zu werden. Aller Abfall bezieht sie hier auf die Gesamtabfallmenge, die im Abfallsektor behandelt wird, d.h. auch Abfälle, die aktuell in der Restmülltonne entsorgt werden, werden dazugezählt. Basierend auf den Zahlen von 2019 würde sich die CMU auf nur knapp 22 % erhöhen (s. Tabelle 3) – und dass, trotz der sehr optimistischen Annahme, dass aller Abfall recycelt werden kann. Den größten Beitrag zur Erhöhung leistet dabei die Menge der Abfälle, die gegenwärtig verfüllt werden, da es sich hierbei um einen sehr großen Stoffstrom handelt.

Es wird deutlich, das Recycling im Abfallsektor alleine nicht ausreicht, um eine umfassende Kreislaufwirtschaft zu erreichen. Zu groß sind die Verluste, bspw. durch Verbrennung von fossilen Rohstoffen, durch Dissipation oder durch Akkumulation im anthropogenen Lager (in 2017 482 Mio. tonnen, siehe Abbildung 14 bzw. Abbildung 15)¹. Die Menge an Sekundärrohstoffen, die aus dem Abfallsektor gewonnen werden kann, ist selbst bei sehr ambitioniertem Recycling zu niedrig um den Rohstoffbedarf zu decken. Wichtig ist an dieser Stelle noch einmal zu betonen, dass bei der Berechnung der CMU nach den Rechenvorschriften von Eurostat Wiederverwendung und Recycling außerhalb des Abfallsektors nicht berücksichtigt werden – das heißt, deren Potenziale sind im theoretischen Steigerungspotenzial ebenfalls nicht erfasst.

¹ Für weitere Informationen siehe https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf

Tabelle 3: Theoretische Steigerungspotenziale der CMU

	CMU (2019)	...bei Recycling der gesamten Abfallmenge	Differenz	...davon Verfüllung	...davon De- ponierung	...davon ener- getische Ver- wertung	...davon Ver- brennung
Insgesamt	12,0 %	21,8 %	9,8 %	5,4 %	2,6 %	0,0 %	1,8 %
Biomasse	7,6 %	15,0 %	7,4 %	0,5 %	0,5 %	0,7 %	5,7 %
Erze	32,9 %	33,4 %	0,5 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,0 %
Nichtmetall. Mineralien	17,5 %	33,1 %	15,6 %	9,6 %	4,9 %	0,3 %	0,7 %
Fossile Roh- stoffe	2,5 %	3,7 %	1,2 %	(-0,7 %)	(-0,5 %)	(-0,5 %)	2,9 %

Quelle: Eigene Berechnung

3.3.2 Technische Potenziale

Nicht alle in Deutschland genutzten Rohstoffe lassen sich im Kreislauf führen. So werden biotische Rohstoffe überwiegend als Nahrung oder Futter aufgenommen, fossile Rohstoffe werden großenteils zur Nutzenergiegewinnung verbrannt, mineralische Rohstoffe werden verbaut. Diese Rohstoffe stehen für eine Wiedernutzung kaum bzw. nur mit sehr hohem Aufwand oder erst nach sehr langer Zeit zur Verfügung.

Gleichzeitig lassen sich viele Abfälle nicht oder nur mit einem immensen Aufwand wiedernutzen. Ein einfaches Beispiel ist Kehrriech von Straßen: um diesen zu nutzen, müssten Zigarettenkippen, Verpackungsabfälle, Laub, Reifenabrieb und inertes Material und vieles mehr, was sich im Straßenkehrriech findet, wieder sauber voneinander getrennt werden – ein hoher Aufwand. Die Recyclingpotenziale aus Abfällen, die sich in Deutschland realisieren lassen, sind daher geringer als das theoretische Steigerungspotenzial.

Gegenwärtig existieren jedoch noch viele Potenziale zur Wiedernutzung von Abfällen, die noch nicht ausgeschöpft sind. Die Wiedernutzung von rezyklierten Abfällen ist von verschiedenen Faktoren abhängig: von den technischen Möglichkeiten, von den verfügbaren Mengen und von den Einsatzmöglichkeiten der Rezyklate bzw. Sekundärmaterialien. Im Folgenden wird ein Überblick über gegenwärtig bekannte Potenziale gegeben.

Metalle

Metallschrotte lassen sich theoretisch vollständig im Kreislauf führen. Sekundärmetalle aus Schrotten und Altprodukten sind sogar oftmals im Vergleich zum Primärmetall ökologisch vorteilhaft. Allerdings ist davon auszugehen, dass selbst eine (theoretisch denkbare) vollständige Kreislaufführung nicht den gesamten Primärmetallverbrauch ersetzen könnte, weil sich der Bestand an Gebäuden und Gütern, in denen Metalle mehrere Jahre bzw. Jahrzehnte gebunden sind, in Deutschland gegenwärtig noch immer erhöht. Das Umweltbundesamt

(2017) schätzt, dass in 2010 pro Kopf 14,12 Tonnen Metall im anthropogenen Lager gebunden waren (Müller et al. 2017)¹. Der jährliche Verbrauch (RMC) pro Person liegt bei rund einer Tonne Metallerz, ein Teil davon wird im wachsenden Gebäude- und Infrastrukturbestand gebunden (Destatis 2020b).

Wesentliche Hürden für eine vollständige Kreislaufführung bestehen in der unvollständigen Sammlung, beispielsweise von Elektroaltgeräten oder aufgrund der unvollständigen Rückgewinnung der Metalle aus Gebäuden und Infrastrukturen. Auch Legierungen und Verbundstoffe mit Metallanteilen stellen Herausforderungen bei der Rückgewinnung dar, nicht für alle Metalle existieren Technologien zur Rückgewinnung aus Altgeräten. Viele Technologiemetalle werden in sehr kleinen Mengen, z.B. in Handys oder Laptops, eingesetzt, die Rückgewinnung ist entsprechend aufwändig, dissipative Verluste können nicht vollständig vermieden werden. Folgende Potenziale werden unter anderem für Deutschland gesehen:

- Das Umweltbundesamt (2019) geht davon aus, dass 67 % der produzierten Eisen- und Stahlmengen und 90 % der produzierten Kupfer-, Blei-, Aluminium und Zinkmengen aus Schrotten bestehen können. Im Falle der Stahlproduktion bedeutet dies, dass die Stahlherstellung von der gegenwärtig in Deutschland dominierenden Hochofenroute zunehmend auf Elektrostahlverfahren umgestellt wird (Purr et al. 2019).
- Das Potenzial der Rückgewinnung von 12 ausgewählten kritischen Technologie- und Edelmetallen aus 30 Elektroaltgeräten wurde beispielhaft im Projekt RePro (Sander et al. 2019) untersucht. Werden Sammelsysteme und Rückgewinnungstechnologien optimiert, könnten im Jahr 2020
 - 47 % der Goldmengen aus den Geräten (des Abfallpotenzials) wiedergewonnen werden (Status quo 16 %) sowie
 - 54 % der Silbermengen (Status quo 13 %)
 - 54 % der Palladiummengen (Status quo 21 %)
 - 33 % der Kobaltmengen (Status quo 2 %)
 - 28 % der Neodymmengen (Status quo 0 %)
 - 22 % der Indiummengen (Status quo 0 %)
 - 28 % der Tantalummengen (Status quo 0 %).
- Buchert und Sutter (2020) gehen davon aus, dass in 2050 jeweils rund 40 % des Lithium-, Kobalt- und Nickelbedarfs für Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität durch Recycling gedeckt werden kann.
- Im RESCUE-Projekt wurde aufgrund der Heterogenität der Technologie- und Edelmetalle in den technologisch ambitionierten Szenarien GreenMe und GreenSupreme unterstellt, dass eine Erhöhung der Recycling- und Einsatzmengen pauschal um 25 % bis 2050 erreichbar ist (Purr et al. 2019).

Mineralische Rohstoffe und Produkte

Nicht-metallische mineralische Rohstoffe werden vor allem im Bausektor verwendet, dazu gehören beispielsweise Sand, Kies, Kalk (Zement/Beton), Gips oder Ton. Der Bausektor ist einer der materialintensivsten Sektoren, daher sind Recycling- und Substitutionspotenziale in diesem Sektor besonders relevant. Im Gegensatz zu Metallen können mineralische Rohstoffe im Allgemeinen nicht wieder eingeschmolzen und mit einem mehr oder weniger verträglichen Aufwand in den Ausgangszustand zurückversetzt werden, weil die chemische Struktur bei der Verarbeitung verändert wurde. Ein gutes Beispiel ist Beton, der sich nicht mit einem vertretbaren Aufwand in die ursprünglichen Rohstoffe Kalk, Sand, Kies, Wasser

¹ Davon 10,7 Tonnen im Hochbau, 1,4 Tonnen im Tiefbau, 1,8 in Konsum- und Kapitalgütern und 0,2 Tonnen in der Haustechnik.

und Zuschlagsstoffe trennen lässt. Die Potenziale der Wiedernutzung sind daher viel begrenzter als bei Metallen. Manche mineralischen Rohstoffe lassen sich gut recyceln und im gleichen oder einem sehr ähnlichen Produkt wieder nutzen, ein Beispiel ist Glas. Die meisten mineralischen Recyclingstoffe werden jedoch in anderen (als den ursprünglichen), häufig minderwertigeren Anwendungen genutzt (bspw. Verfüllungen), man spricht dann von sogenanntem Downcycling, das im Tiefbau verbreitet ist. Im Tiefbau werden bereits sehr große Mengen Rezyklate eingesetzt, daher werden im Folgenden der Hochbau und sonstige mineralische Rohstoffe betrachtet.

Die Potenziale von Recyclingmaterialien zur Wiederverwendung im **Hochbau** wurden von Deilmann et al. (2016) auf der Basis von Pilotprojekten und Expertenbefragungen erhoben. Folgende Tabelle 4 zeigt die mittel- bis langfristigen Recyclinganteile im Hochbau. Während für manche Produktsegmente hohe Recyclinganteile gesehen werden wie beispielsweise für mineralische Wärmedämmungen oder für Kunststofffenster und -türen, bestehen für andere Produktsegmente keine (Konstruktionsholz) oder nur geringe Potenziale (z.B. Kalksandstein oder Porenbetonstein).

Tabelle 4: Potenziale für Recyclinganteile im Produktsegment für die Hochbauverwendung in %, 2030 und 2050

	Anteil 2010	Anteil 2030	Anteil 2050	Bemerkung ¹
Beton	0,4	6,0	12,0	
Ziegel	0,0	10,0	15,0	<i>Schon heute werden Fehlchargen in der Produktion wieder in die Produktion zurückgeführt. Das geht, wenn der Ton als eigentlicher Rohstoff sehr fett ist; post-consumer wird das nicht gemacht, weil sich das Material nicht erneut „brennen“ lässt.</i>
Kalksandstein	0,0	5,0	5,0	
Porenbetonstein	0,0	2,0	5,0	
Sonstiges Mineralisches/ Schüttungen	6,0	21,0	21,0	
Gipskarton/ Gipswandbauplatten	0,0	30,0	50,0	<i>50 % Recyclinggips in den Gipskartonplatten ist nur zu erreichen, wenn die Produktionsmenge stark zurückgeht. Im Moment reichen die Mengen, die zu Abfall werden, bei Weitem nicht aus, um den Rohstoffbedarf zu decken.</i>
Sonstige Gipsprodukte	0,0	0,0	5,0	<i>Gips aus dem Recycling ist leichter in sonstigen Gipsprodukten (bspw. Putze) als in Gipskartonplatten nutzbar.</i>
Konstruktionsholz	0,0	0,0	0,0	
Holz-Bauplatten	4,0	10,0	20,0	
Flachglas	15,0	25,0	35,0	

¹ Die Bemerkungen basieren auf Informationen aus diversen Factsheets die im Rahmen des KartAL Projekts für das Umweltbundesamt erstellt wurden. Siehe u.a. ifeu Heidelberg gGmbH 2019a, c; b.

	Anteil 2010	Anteil 2030	Anteil 2050	Bemerkung ¹
Mineralische Wärmedämmungen, davon ca. 40 % Steinwolle mit RC 0, 15, 20	27,0	42,0	56,0	<i>Gegenwärtig gehen die alten Dämmstoffe noch nicht zurück in die Produktion; die Produktion von Glaswolle greift auf den Glasscherbenkreislauf von Behälterglas zurück</i>
Erdölbasierte Wärmedämmungen	10,0	19,0	19,0	<i>Die Analyse für die Gegenwart teilen wir nicht.</i>
Kunststofftüren/-fenster	13,0	25,0	50,0	
Sonstige Kunststoffe/PVC-Bahnenware/Teppiche	1,0	5,0	10,0	
Metalle (nicht Untersuchungsgegenstand)	50,0	60,0	70,0	<i>Der klassische Baustahl ist heute schon zu nahezu 100 % RC</i>
Sonstige	0,0	2,0	5,0	

Quelle: Deilmann et al. 2016; ¹ifeu Heidelberg gGmbH, 2019 a-c

Neben dem Hoch- und Tiefbau sind weitere Potenziale:

- Altglas wird bereits zu einem hohen Prozentsatz recycelt. Im Jahr 2017 wurden 84,4 % vom Glas aus Verpackungsaufkommen (Behälterglas) recycelt (UBA 2020d). Über alle Glasprodukte hinweg liegt der Anteil des Altglases an der Glasproduktion, der sogenannte Scherbenanteil, gegenwärtig bei rund 40 %. Das Umweltbundesamt geht davon aus, dass der durchschnittliche Scherbenanteil auf 45 % in 2030 und auf 69 % in 2050 gesteigert werden kann (Purr et al. 2019).

Biotische Rohstoffe

Der Großteil der biotisch genutzten Primärrohstoffe wird für die Zubereitung von Nahrungsmitteln und Getränke sowie für Futtermittel genutzt. Nur ein kleiner Anteil der genutzten biotischen Rohstoffe wird stofflich genutzt, beispielsweise für Papier, (Holz-) Möbel, Kleidung oder für Kompost. Diese stehen für ein stoffliches Recycling zur Verfügung.

Papier, Pappe und Kartonagen können mehrfach wiederverwertet werden. In 2018 lag die Altpapiereinsatzquote, d.h. der Altpapieranteil an der gesamten Papierproduktion in Deutschland, bei 76 % (UBA 2020e). Die Altpapiereinsatzquote liegt bei Verpackungspapieren und -pappen bei 100 %. Sie ist jedoch bei grafischen Papieren und Hygienepapieren mit 51 bzw. 50 % noch vergleichsweise niedrig. Vor dem Hintergrund dieser Zahlen sieht das Umweltbundesamt weitere technische Potenziale, mehr Altpapier bei der Herstellung von Zeitschriften-, Büro- und Administrationspapieren und bei der Produktion von Hygienepapieren zu nutzen, und hält eine Steigerung auf knapp 80 % für realistisch (Purr et al. 2019; UBA 2020e).

Altholz wird in Deutschland überwiegend energetisch verwertet. In 2016 fielen etwa 10,0 Mio. Tonnen Altholz an, von denen 79 % energetisch und 15 % stofflich verwertet wurden. Weitere 6 % wurden beseitigt (Flamme et al. 2020). Altholz wird in vier Schadstoffkategorien

eingeteilt (von I = naturbelassenes, praktisch nicht verunreinigtes Holz bis IV = mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz). Je nach Belastung kann Holz in unterschiedlichen Anwendungen mehrfach genutzt werden (Kaskadennutzung). Altholz geringer Schadstoffstufen wird in Deutschland in Spanplatten recycelt. Im Durchschnitt haben die in 2016 in Deutschland produzierten Spanplatten einen Altholzanteil von ca. 27 %. Dieser Anteil könnte technisch erhöht werden, in Dänemark liegt der Anteil beispielsweise bei 61 % (unter Verwendung deutscher Schadstoffklassen), in Italien sogar bei 90 %. Flamme et al. (2020) untersuchten, ausgehend von verfügbaren Mengen von Altholz der Schadstoffklasse I und unter Berücksichtigung von Transportentfernungen zwei Szenarien zur Erhöhung der stofflich recycelten Mengen. Im ambitionierteren Szenario wurde ein Altholzanteil von 60 % in Spanplatten angenommen. Das heißt, 1,8 Mio. Tonnen Altholz würden zusätzlich stofflich verwertet, insgesamt 3,3 Mio. Tonnen Altholz (Flamme et al. 2020). Fehrenbach et al. (2017) schätzt die stofflich wiedernutzbare Menge noch höher auf insgesamt 4,2 Mio. Tonnen, unter der Annahme, dass bis zu 100 % Altholznutzung in Span- und Faserplatten sowie Möbeln (je nach Produkt) realisierbar sind.

Vermeidbare Lebensmittelabfälle stellen eine beachtliche Abfallmenge dar, global werden etwa ein Drittel der produzierten Lebensmittel weggeworfen (FAO 2020). Ein Ziel der Bundesregierung besteht darin, Lebensmittelabfälle im Handel und bei Verbrauchern um 50 % bis 2030 zu reduzieren. In 2015 betrug die Lebensmittelabfälle in Deutschland 11,9 Mio. Tonnen Frischmasse, 12 % entstanden bei der Primärproduktion, 18 % bei der Verarbeitung, 4 % im Handel, 14 % bei der Außer-Haus-Verpflegung und 52 % in Haushalten (Schmidt et al. 2019). Die Hälfte davon ist entsprechend dem Ziel der Bundesregierung vermeidbar (Purr et al. 2019; Schmidt et al. 2019).

Unvermeidbare Lebensmittelabfälle und Grünabfälle zeigen bei einer Kaskadennutzung hohe Potenziale mit ökologischen Vorteilen (Knappe et al. 2012, 2019). (Unvermeidbare) Lebensmittelabfälle und Grünabfälle haben ein energetisches Potenzial, das durch eine Vergärung (Biogas) erschlossen werden kann. Das Umweltbundesamt (2015) geht von einem Potenzial aus, das einer Mais-Anbaufläche von rund 80 Tsd. ha entspricht (etwa die Größe Berlins). Auch das Grüngut, und zwar insbesondere die Holzanteile, haben ein energetisches Potenzial. Gärreste und weniger holzige Anteile des Grünguts können zu hochwertigen Komposten und Substraten verarbeitet werden. Komposte aus Lebensmittelabfällen sind dabei im allgemeinen nährstoffreicher und daher als Dünger in der Landwirtschaft geeignet, Komposte aus Grünschnitt sind im Allgemeinen nährstoffärmer und stellen ein Substitut von Torf dar (Knappe et al. 2019). Raussen et al. (2019) schätzen, dass allein in Hessen ein Kompostpotenzial von 45 – 100 Tsd. Tonnen pro Jahr besteht. Dornbusch et al. (2020) analysieren, dass in 2017 noch immer 39 % des Restmülls organische Abfälle sind; eine Entsorgung in der Biotonne mit entsprechender Verwertung stellt ein großes Potenzial dar.

Textilien: Nach Fehrenbach et al. (2017) existiert derzeit ein etablierter Recyclingmarkt für Naturfasern und Alttextilien. Zusätzliche Potenziale sehen Fehrenbach et al. (2017) darin, dass Altkleider, die keiner Kleidersammlung zugeführt werden (rund 33 % der Alttextilien), sowie thermisch verwertete und entsorgte Alttextilien (jeweils 7 %) ebenso einem stofflichen Recyclingmarkt zugeführt werden. Die genannten Mengen würden bei einer vollständigen Verwertung das gegenwärtige (sekundäre) Rohstoffvolumen um 526 Tsd. Tonnen erhöhen und somit nahezu verdoppeln. Unter Berücksichtigung von 20 % Ausschussmengen, z.B. weil Fasern nicht unendlich oft wiederverwertet werden können, gehen Fehrenbach et al. (2017) davon aus, dass zukünftig insgesamt 0,9 Mio. Tonnen Alttextilien verwendet werden können (Fehrenbach et al. 2017). Werden aktuellere Zahlen für Altkleider genutzt, und die methodische Verrechnung nach Fehrenbach wiederholt, so stehen zusätzlich etwas weniger, ca. 0,49 Mio. t Alttextilien zur Verfügung (BVSE, 2020).

Fossile Materialien/ Kunststoffe:

Fossile Rohstoffe können nur dann wiederverwendet werden, wenn sie stofflich genutzt wurden. Nur ein geringer Anteil der fossilen Rohstoffe wird stofflich genutzt, um Kunststoffe, Farben, Lacke oder andere Produkte zu erzeugen. So wurden in 2017 in Deutschland 18,1 Mio. Tonnen fossile Rohstoffe in der chemischen Industrie stofflich genutzt, davon 15,5 Mio. t Naphtha und Erdölderivate, 2,3 Mio. Tonnen Erdgas und 0,3 Mio. t Kohle (VCI 2020). Zum Vergleich: in Deutschland wurden im selben Jahr 53,4 Mio. Tonnen Steinkohle, 171,2 Mio. Tonnen Braunkohle, 109,3 Mio. Tonnen Erdöl und Erdölprodukte sowie Gase im Umfang von rund 108 Mio. Tonnen Steinkohleäquivalente für die Primärenergiegewinnung eingesetzt (AGEB 2019). Die chemische Industrie produzierte in 2017 [2019] insgesamt 21,8 [20,2] Mio. Tonnen Kunststoffe, davon 11,0 [10,3] Mio. Tonnen Kunstwerkstoffe. Der Rest entfällt unter anderem auf Farben, Klebstoffe, Lacke und Fasern, die dispers angewendet werden, wodurch eine Wiederverwertung erschwert ist. Insgesamt wurden 1,8 [2,0] Mio. Tonnen Rezyklate in 2017 [2019] eingesetzt, was 12,3 bzw. 13,7 % Rezyklat und 87,7 bzw. 86,3 % Primärmaterial bedeutet (conversio 2018, 2020).

In 2019 fielen rund 6,23 Mio. Tonnen Kunststoffabfälle an, davon 5,35 Mio. Tonnen Post-consumer Abfälle. Von den gesamten Kunststoffabfällen gingen 2,93 Mio. Tonnen in die stoffliche Wiederverwendung. Weitere 3,31 Mio. Tonnen wurden energetisch verwertet, d.h. verbrannt (conversio 2020). Folgende Potenziale für die Erhöhung der stofflichen Kreislaufführung werden gesehen:

- BKV und GVM (2020) gehen davon aus, dass zwischen 21 und 51 % der produzierten Kunststoffverpackungen mit Rezyklaten hergestellt werden könnte, dies entspricht 960 bis 2.221 Mio. Tonnen Rezyklat (BKV / GVM 2020).
- Wilts et al. (2014) sehen folgende werkstoffliche Verwertungspotenziale: 780 – 850 Tsd. Tonnen der gemischt gewerblichen Siedlungsabfälle (zusätzlich zu 70 Tsd. Tonnen Status quo); 290 Tsd. Tonnen aus LVP und StNVP (zusätzlich zu 490 Tsd. Tonnen im Status quo); 27 Tsd. Tonnen aus Elektro- /Elektronikaltgeräten (zusätzlich zu 18 Tsd. Tonnen) und 10 Tsd. Tonnen aus Altfahrzeugen (zusätzlich zu 2 Tsd. Tonnen) (Wilts et al. 2014).
- Die stoffliche Recyclingquote von Post-consumer Kunststoffabfällen kann nach UBA auf bis zu 75 % erhöht werden (UBA 2016a).

Zwischenfazit

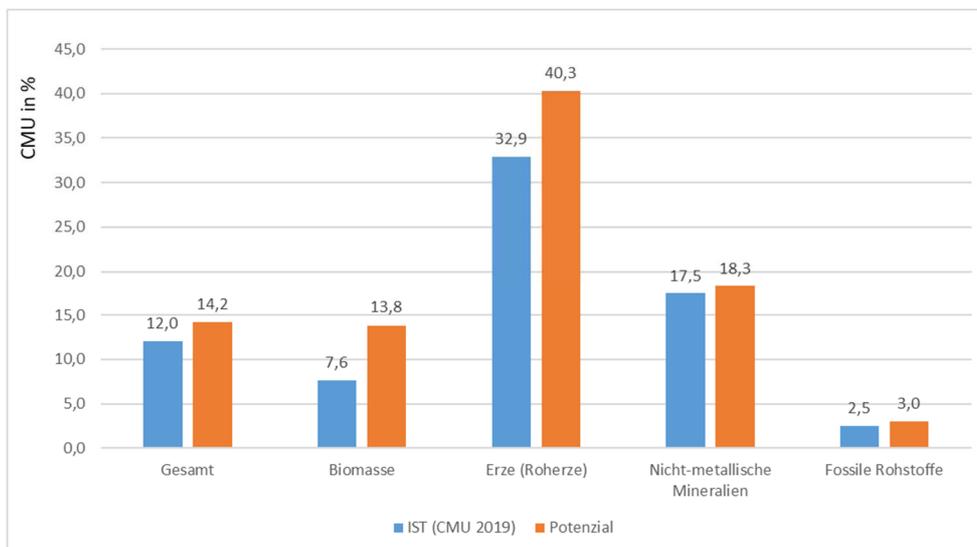
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in allen Stoffgruppen bzw. nahezu allen Abfallfraktionen Potenzial vorhanden sind, um die Rezyklatmengen zu erhöhen. Nicht alle aufgeführten technischen Potenziale können hinreichend gut quantifiziert werden. Für folgende der oben genannten technischen Potenziale liegen Mengenangaben vor bzw. können Mengenangaben direkt abgeleitet werden:

- zusätzliche Potenziale für Altholz nach Fehrenbach et al. (2017),
- zusätzliche Potenziale für nicht vermeidbare Bioabfälle nach Dornbusch et al. (2020),
- zusätzliche Potenziale für Altpapier bei einer Steigerung der Altpapiereinsatzquote auf 80 %,
- zusätzliche Potenziale für Textilien nach Fehrenbach et al. (2017),

- zusätzliche Potenziale für Metallrecycling, konkret die zusätzlichen Eisen-, Kupfer-, Aluminium-, Blei- und Zinkmengen, die im Szenario GreenMe im RESCUE-Projekt im Jahr 2030 berechnet wurden (Purr et al., 2019; Dittrich et al., 2020c),
- zusätzliche Potenziale für Altglas, hier ebenso aus dem Szenario GreenMe des RESCUE-Projekts im Jahr 2030 (Purr et al., 2019; Dittrich et al., 2020c),
- zusätzliche RC-Mengen, die von Deilmann et al. (2016) im Szenario NA-RC für 2030 angenommen wurden,
- zusätzliche Potenziale für Kunststoffrecycling nach Wilts et al. (2014)

Untenstehende Abbildung 18 zeigt die möglichen Steigerungen der CMU (Variante 1), wenn die oben genannten Potenziale gehoben werden würden. Hierbei wurden vereinfacht unterstellt, dass die Sekundärrohstoffe 1:1 Primärrohstoffe substituieren, die sonstige Menge der verbrauchten Rohstoffe jedoch konstant bleibt. Die größten Steigerungen sind demnach in den Stoffgruppen Biomasse und Erze zu finden. Das Heben der Potenziale bei den nicht-metallischen Mineralen und fossilen Energieträgern wirkt sich vor dem Hintergrund der hohen Gesamtmengen der genutzten Rohstoffe nur geringfügig auf die CMU aus. Das dargestellte technische Potenzial ist geringer als das theoretische Potenzial, in dem vor allem die Nutzung der Verfüllungen zu einem Anstieg führte.

Abbildung 18: CMU nach Stoffgruppen, wenn genannte Potenziale gehoben werden würden



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnung.

3.3.3 Steigerungspotenziale durch die Energiewende

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, wie stark die CMU durch die Energiewende gesteigert werden kann. Die Energiewende verkleinert die Gesamtmenge der verbrauchten Rohstoffe und damit den Nenner bei der Berechnung der CMU.

Kern der Energiewende ist die Reduktion des Verbrauchs von fossilen Rohstoffen. 2019 wurden rund 368 Mio. Tonnen fossile Rohstoffe in Deutschland verbraucht (ohne Vorketten),

das sind 29,7 % des gesamten direkten Materialverbrauchs (DMC) (Eurostat 2020a). Einschließlich Vorketten liegt der inländische Verbrauch (RMC) von fossilen Rohstoffen etwas geringer aufgrund des hohen Anteils fossiler Rohstoffe in exportierten Gütern. Der Verbrauch liegt bei rund 345 Mio. Tonnen bzw. 25 % des RMC in 2018 (eigene Berechnungen).

Der weitaus überwiegende Anteil der fossilen Rohstoffe wird energetisch genutzt, das heißt verbrannt, um Nutzenergie (Strom, Wärme, Bewegung) zu gewinnen. Je nach Jahr schwankt der Anteil der energetisch genutzten fossilen Rohstoffe an den insgesamt genutzten fossilen Rohstoffen zwischen 85 und 90 %. Im Zuge der Energiewende wird die Verbrennung von fossilen Rohstoffen durch die Nutzung von erneuerbaren Energiequellen (Sonne, Wind, Wasser, Geothermie) zunehmend ersetzt. Gleichzeitig steigt der Bedarf nach Rohstoffen, die für die technische Infrastruktur der erneuerbaren Energien wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen oder Stromnetze erforderlich sind.

Um die mittelfristigen Potenziale der CMU durch die Energiewende (Zieljahr 2030) abzuschätzen, werden Szenarien zur Transformation genutzt, in denen auch der Rohstoffbedarf vollständig berechnet wurde. Für Deutschland liegen viele Vorschläge für unterschiedliche Transformationspfade vor, die sich hinsichtlich des Ambitionsniveaus und der Ausgestaltung teilweise stark voneinander unterscheiden. Allerdings ist die Auswahl von Szenarien, in denen auch der Rohstoffbedarf von Deutschland vollständig für die gesamte Volkswirtschaft und einschließlich der Berechnungen der technischen Infrastrukturen berechnet wurde, begrenzt. Im Folgenden werden zwei Szenarien genutzt, von denen das eine Szenario ein eher geringes und das andere ein sehr hohes Ambitionsniveau der Energiewende abbilden. Gemeinsam zeigen die gegensätzlichen Szenarien somit einen Korridor der Energiewende:

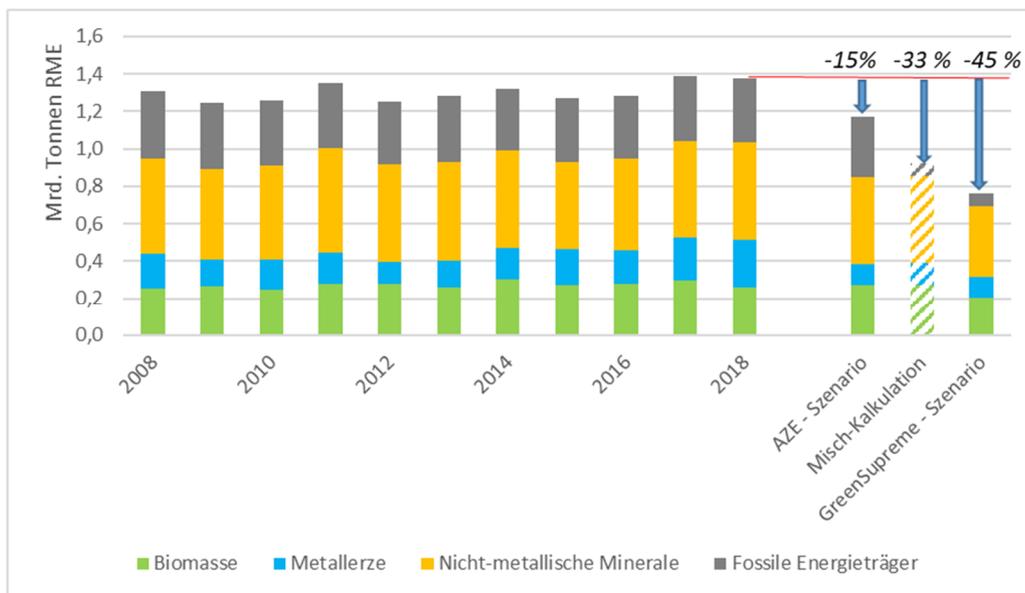
- Das Szenario „Anzunehmende zukünftige Entwicklung“ (AZE) aus dem Projekt DeteRes¹ zeigt eine wenig ambitionierte Energiewende (Dittrich et al. 2018). Im Szenario wurden rohstoffrelevante Prognosen zur Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung sowie zur Siedlungs- und Bauentwicklung berücksichtigt und allgemeine Trends, wie der jährliche Anstieg der Rohstoffeffizienz, fortgeschrieben. Darüber hinaus werden gesetzliche Vorgaben, die bis 2014 getroffen wurden, berücksichtigt, darunter die Vorgaben zum Ausbau der Erneuerbaren Energie und zur Förderung der Elektromobilität.
- Das Szenario „GreenSupreme“ aus dem Projekt RESCUE zeigt hingegen eine sehr ambitionierte Transformation (Dittrich et al. 2020a; b; c; d; Purr et al. 2019). In dem Szenario werden andere Rahmenannahmen als im vorherigen Szenario unterstellt, bspw. sinkt das BIP-Wachstum bis auf Null in 2030, die Siedlungsentwicklung geht viel stärker zurück, Primärbiomasse wird nicht energetisch genutzt und die Rohstoffe werden viel effizienter genutzt. Darüber hinaus wird u.a. angenommen, dass bis 2030 der Ausstieg aus der Kohleverstromung abgeschlossen ist und die Stromerzeugung vollständig durch erneuerbare Energien gedeckt wird. Es wird weiter unterstellt, dass wesentliche Industrien mit tiefgreifenden Umstellungen begonnen haben, Elektromobilität weit verbreitet ist und der Gebäudebestand zügig und ambitioniert saniert bzw. erneuert wird.
- „Misch-Kalkulation“: da im Szenario „GreenSupreme“ auch viele Veränderungen angenommen wurden, die nicht direkt aus der Energiewende resultieren, wird auch eine vereinfachte „Misch-Kalkulation“ vorgenommen. Es werden die Entwicklungen aus dem oben genannten Szenario AZE und die wesentlichen Änderungen hinsichtlich des Energiesystems aus dem Szenario GreenSupreme berücksichtigt. Dies

¹ Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRes) im Auftrag des Umweltbundesamtes.

drückt kein konsistentes Szenario aus, sondern es stellt eine Übersichtsrechnung dar, mit der aufgezeigt werden soll, wie groß der alleinige Effekt einer ambitionierten Energiewende ungefähr sein könnte.

Abbildung 19 zeigt vor dem Hintergrund der Entwicklung in den letzten zehn Jahren den Unterschied im Rohstoffverbrauch in 2030, der aus einer wenig ambitionierten und aus einer sehr ambitionierten Umstellung resultiert: so sinkt der RMC um 15,1 % im weniger ambitionierten Szenario AZE und um 45 % im sehr ambitionierten Szenario GreenSupreme gegenüber 2018.

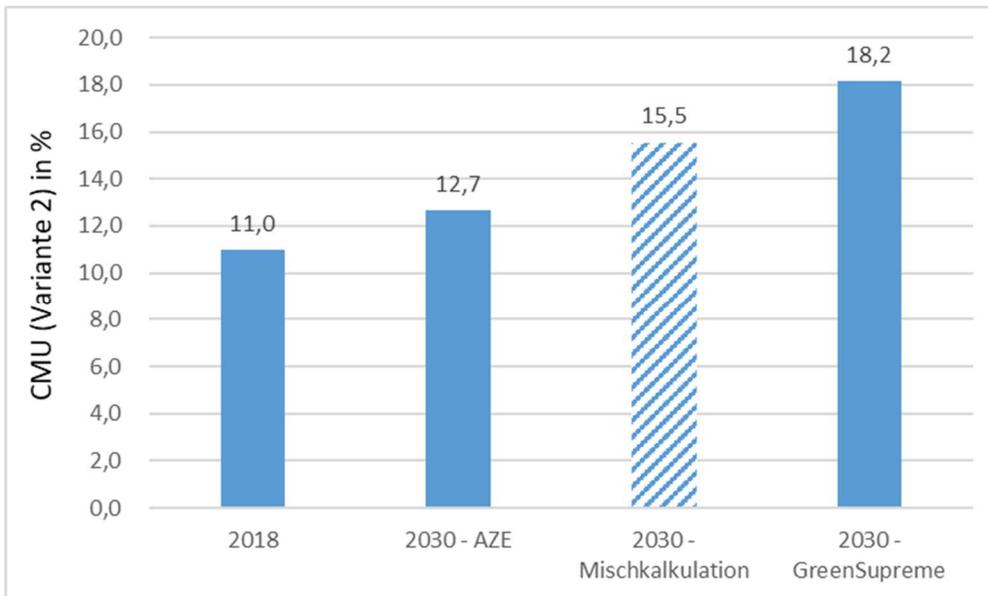
Abbildung 19: Rohstoffverbrauch (RMC) 2008 - 2018 und Rückgang in 2030 in verschiedenen Szenarien



Quelle: eigene Berechnungen für 2008 bis 2018 auf der Basis des Country-Tools von Eurostat; Dittrich et al. (2018) für 2030 AZE, Dittrich et al. (2020) bzw. Purr et al. (2019) für 2030 GreenSupreme.

Der sinkende Rohstoffverbrauch hat Auswirkungen auf die CMU, selbst wenn sich die Menge der rezyklierten Abfallstoffe nicht ändert. Im Falle einer wenig ambitionierten Energiewende könnte die CMU (Berechnung nach Variante 2 mit dem RMC) unter der Annahme, dass die rezyklierte Abfallmenge konstant bleibt, bis 2030 auf 12,7 % und im Falle einer sehr ambitionierten Energiewende wie im Szenario GreenSupreme auf 18,2 % steigen. Auf die ambitionierte Energiewende im engeren Sinne entfällt dabei größenordnungsmäßig eine Steigerung auf 15,5 % (Abbildung 20). Es wird deutlich, dass die Energiewende c.p. zur Erhöhung der CMU beitragen kann.

Abbildung 20: CMU (Variante 2) in 2030 unter verschiedenen Annahmen zur Energiewende



Quelle: eigene Berechnungen, unter anderem auf der Basis von Dittrich et al. (2018) für 2030 AZE, Dittrich et al. (2020) bzw. Purr et al. (2019) für 2030 GreenSupreme

3.3.4 Sonstige Faktoren

Im Folgenden sollen weitere Faktoren hinsichtlich ihrer Steigerungspotenziale auf die CMU untersucht werden. Im Folgenden wird analysiert, welchen Einfluss

- rohstoffsparende Technologien, darunter Leichtbau, Bionik, Remanufacturing u.Ä.,
- Ausweitung der Produktnutzung über Langlebigkeit von Gütern, Reparieren und ReUse, Produktqualität, Sharing bzw. die Ökonomie des Teilens, sowie
- Suffizienz und Konsumreduktion

auf die CMU *ceteris paribus* (*c.p.*) haben. Im Rahmen dieser Studie können keine eigenen und umfassenden Modellierungen vorgenommen werden. Daher wird im Folgenden auf bestehende Berechnungen zurückgegriffen, diese werden hinsichtlich der genannten Faktoren untersucht.

Rohstoffsparende Technologien

Es existiert eine Vielzahl rohstoffsparender Technologien in nahezu jedem Wirtschaftssektor, von der Landwirtschaft und dem Bergbau über Basisindustrien wie die Metallverarbeitung oder Chemie bis hin zum Maschinenbau, der Autoindustrie und dem Bausektor. Beispielsweise können

- Verschnitte und Abfälle bei der Produktion vermindert werden,
- durch Konstruktions- oder Prozessveränderungen weniger Materialien erforderlich sein,
- materialintensive (schwerere) durch weniger materialintensive (leichtere) Materialien ersetzt werden, sowie

- die Designs bzw. Ausführungen der Produkte verändert werden.

Diese Veränderungen münden in einen zunehmend effizienteren Einsatz von Rohstoffen. Man spricht von der Rohstoffeffizienz, die sich durch den Einsatz von rohstoffsparenden Technologien zunehmend verbessert. Recycling ist weiterhin ein wichtiger Ansatz, um (Primär-)Rohstoffe einzusparen. In dieser Studie wurden Recycling und Wiedernutzung z.B. über Kaskaden im Kapitel 3.3 untersucht und werden daher in diesem Kapitel nicht vertieft.

Über die gesamte deutsche Volkswirtschaft hinweg war empirisch zu beobachten, dass sich die Rohstoffeffizienz im produzierenden Gewerbe und in den Dienstleistungen um jährlich etwa 1 % zwischen 1994 und 2010 verbessert hat (ohne strukturelle Effekte der Wiedervereinigung (Dittrich et al. (2018))). Im Projekt DeteRess wurde untersucht, wie sich eine Steigerung der Rohstoffproduktivität auf den Rohstoffkonsum c.p. in 2030 auswirkt: eine Steigerung um 0,2 % pro Jahr, das heißt eine durchschnittliche Steigerung von 1,2 % pro Jahr insgesamt und über zwanzig Jahre hinweg, würde c.p. zu einer Reduktion des RMC von 2,7 % im Vergleich zum Szenario AZE in 2030 führen. Für die CMU bedeutet dies Folgendes: Unter den Annahmen,

- dass die rezyklierten Abfallmengen im Vergleich zu heute konstant bleiben, und
- dass, aufbauend auf dem Szenario AZE (siehe vorheriges Kapitel), zusätzlich rohstoffsparende Technologien und Verfahren in einem Umfang eingesetzt werden, so dass die durchschnittliche Rohstoffproduktivität um 1,2 % p.a. im Inland steigt (zwischen 2010 und 2030),

würde die CMU auf 13,0 % im Jahr 2030 steigen. Dies ist eine leichte Verbesserung gegenüber der CMU im Szenario AZE von 12,7 %. Effekte von zusätzlichem Recycling, zusätzlicher Energiewende, oder sonstigen Änderungen, z.B. im Ausland, sind hierbei nicht enthalten.

Ausweitung der Produktnutzung

Unter der Ausweitung der Produktnutzung wird im Kern die Wirkung definiert, dass die Nachfrage nach Produkten sinkt. Dies kann erreicht werden

- durch langlebigere Güter bspw. aufgrund einer besseren Qualität,
- durch Secondhand Nutzung,
- durch Reparieren von Gütern anstelle eines Neukaufs, oder
- durch das Teilen von Gütern anstelle, dass jede Person das Produkt kauft und besitzt (Teilen statt Besitzen oder Sharing-Economy).

Hierbei gilt zu beachten, dass nicht jedes Produkt unbegrenzt nutzbar ist oder geteilt werden kann. Weiterhin muss beachtet werden, dass die Nutzung von langlebigen oder Secondhandgütern etc. zu einem Rebound-Effekt führen können: Das Geld, das durch Teilen, Langlebigkeit etc. von Haushalten eingespart wird, kann für andere Produkte oder Dienstleistungen ausgegeben werden. Wie hoch dieser Rebound-Effekt sein kann, ist für den Rohstoffkonsum der deutschen Gesamtwirtschaft bislang noch nicht untersucht worden. Daher wird bei den folgenden Beispielen kein Rebound-Effekt unterstellt.

Rund 8,5 % des inländischen Rohstoffkonsums (mit Vorketten) war in 2010 auf die private Nachfrage nach **Kleidung, Möbel, IKT und diversen Gebrauchsgütern** zurückzuführen (Dittrich et al. 2018). Wird dieser Anteil auch für 2018 unterstellt und angenommen, dass sich

die Nachfrage aufgrund der Veränderungen der Konsumnutzung halbiert (auf 1/3 zurückgeht), so steigt die CMU (Variante 2) c.p. und ohne Rückwirkungen von 11,0 % auf 11,41 % (11,57 %).

Kauf und Nutzung der Pkw der privaten Haushalte (ohne Dienstwagen) waren in 2010 für rund 5,9 % des inländischen Rohstoffkonsums (einschl. Vorketten) verantwortlich (Dittrich et al. 2018). Wird dieser Anteil auch für 2018 unterstellt und zudem angenommen, dass sich die Nachfrage nach Neuwagen und nach Pkw-Nutzung aufgrund von Car-Sharing, Mitnahme-Diensten oder Umstieg auf das Fahrrad halbiert (auf 1/3 zurückgehen), so steigt die CMU (Variante 2) c.p. und ohne Rückwirkungen von 11,0 % auf 11,28 % (11,38 %).

Suffizienz und Konsumreduktion

Suffizienz und Konsumreduktion reduzieren wie in den Beispielen zuvor die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen. Im Folgenden werden der Nahrungsmittelverbrauch und die Wohnungsgröße betrachtet, beides ist nur sehr eingeschränkt teilbar und handelbar. Ein Rebound-Effekt – also eine steigende Nachfrage nach anderen Gütern oder Dienstleistungen in Folge von geringeren Ausgaben – wird nicht berücksichtigt (Bei einer bewussten Ernährung könnte unterstellt werden, dass qualitativ höherwertige und somit teurere Nahrungsmittel bevorzugt werden, was einem Rebound-Effekt zumindest entgegenwirken könnte).

Etwa 17,3 % des inländischen Rohstoffkonsums (einschließlich Vorketten) gingen in 2010 auf **die Ernährung** zu Hause sowie in Hotels und Gaststätten zurück (Dittrich et al. 2018) . Der Anteil ist vergleichsweise hoch, denn bei der Ernährung wird das Tierfutter in der Vorkette einberechnet. Wird nun dieser Anteil auf 2019 übertragen und zusätzlich verschiedene, zusammenwirkende Annahmen aus dem GreenSupreme-Szenario im Projekt RESCUE (Purr et al. 2019) unterstellt, darunter

- Umstellung der Ernährungsweise auf ein Maß, das von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung vorgeschlagen wird, hierbei insbesondere Reduktion des Konsums von Fleisch und tierischen Produkten (keine Unterstellung von vegetarischer oder veganer Lebensweise),
- Halbierung der Lebensmittelabfälle,
- technische Verbesserungen beim Düngemittelleinsatz, sowie
- Erhöhung des Ökolandbaus,

so würde die CMU (Variante 2) c.p. und ohne Rückwirkungen auf andere Sektoren von 11,0 % auf 11,98 % steigen.

Ein rohstoffseitig sehr relevanter Faktor sind die Gebäude. Wohngebäude sowie dazugehörige Arbeiten (Reparaturen) oder Dienstleistungen (Vermietung, Vermittlung) sowie Energienachfrage (Strom, Wärme, Warmwasser) waren in 2010 für rund 23,6 % des inländischen Rohstoffkonsums verantwortlich. Ohne die Energienachfrage bei der Nutzung der Wohnung liegt der Anteil bei 14,4 %. Nicht einbezogen sind hierbei zusätzliche Infrastrukturen, darunter Straßen, Kanalisation oder Stromkabel. Die gegenwärtige Wohnfläche pro Person liegt bei rund 47 m² (UBA 2020f). Wird nun der Rohstoffanteil von 2010 auf 2019 übertragen und zusätzlich unterstellt, dass

1. die durchschnittliche Wohnfläche um 10 % (20 %) beim Neubau geringer wäre
2. und in Folge alle dazugehörigen Arbeiten und Dienstleistungen (ohne Energie) langfristig entsprechend sinken würden,

so würde

1. die $CMU_{RMC/Variante\ 2}$ c.p. und ohne Rückwirkungen von rund 11,0 % auf 11,08 % (11,19 %) steigen.
2. Die $CMU_{RMC/Variante\ 2}$ c.p. und ohne Rückwirkungen von rund 11,0 % auf 11,13 % (11,27 %) steigen.

Zwischenfazit

Die verschiedenen Beispiele zeigen, dass Effizienzansätze und die Reduktion der Nachfrage durch Suffizienz und/oder durch Teilen, Secondhand und ähnlichen Ansätzen zur messbaren Reduktion der CMU – jeweils c.p., das heißt alle anderen Faktoren bleiben unverändert – beitragen können. Allerdings ist kein Beitrag alleine ein ausreichend großer Hebel, mit dem signifikante Sprünge zur Steigerung der CMU erreicht werden können. Man muss sich dabei klar machen, dass die möglichen Einsparungen von Primärrohstoffen dabei immer nur ein kleiner Teil im Vergleich zum gesamten Stoffstromverbrauch in Deutschland sind.

3.3.5 Zusammenspiel vieler Faktoren und ihre Wirkungen auf die Kreislaufwirtschaft

Im Projekt RESCUE wurden sehr viele Faktoren zusammen, das heißt einschließlich ihrer Auswirkungen aufeinander, untersucht. Das Projekt RESCUE ist aktuell das einzige Projekt, in dem für Deutschland der primäre und der sekundäre Rohstoffkonsum konsistent berechnet wurde. In dem Projekt wurde allerdings nicht die CMU berechnet, sondern es wurde eine Substitutionsquote quantifiziert (siehe auch folgendes Kapitel 4). Dabei wurde der Sekundäreinsatz von Rohstoffen umgerechnet in die Menge Rohmaterialien, die durch die Sekundärmaterialien eingespart wurden, und diese wurden ins Verhältnis gesetzt zu allen eingesetzten primären und sekundären Rohstoffen. Folgende Szenarien wurden unterschieden, wobei alle Szenarien eine THG-Emissionsminderungen von -95 % gegenüber 1990 bis in 2050 erreichen:

- GreenEe1&2, Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency (GreenEe): Basierend auf dem Projekt “Treibhausgasneutrales Deutschland 2050” und den darin getroffenen Annahmen zur Transformation Deutschlands bis 2050 werden im RESCUE-Projekt die Entwicklung der THG-Emissionen bis 2050 und die damit einhergehende Rohstoffanspruchnahme modelliert. Der Schwerpunkt dieser Szenarien besteht darin, dass die Energieeffizienzpotenziale in allen Anwendungsbereichen weitgehend erschlossen werden. Während in GreenEe1 die Industrie insgesamt ihre Produktionskapazitäten kontinuierlich steigert und die Exporte weiter ansteigen, erfolgt in GreenEe2 ein ausgeglichenerer globaler Handel, so dass die nationalen Produktionskapazitäten in weiten Bereichen rückläufig sind.
- GreenLate, Germany – resource efficient and GHG neutral – Late transition: Auch dieses Szenario kommt der Treibhausgasneutralität nahe. Die dafür notwendigen Klimaschutzmaßnahmen werden aber im Vergleich zu GreenEe erst zu einem späteren Zeitpunkt intensiviert und sind bei der Energieeffizienz mit einem geringeren Ambitionsniveau verbunden.
- GreenMe, Germany – resource efficient and GHG neutral – Material efficiency: Ergänzend zu den GreenEe-Szenarien wird hier zusätzlich ein hohes technisches Ambitionsniveau bei der Erschließung der Rohstoffeffizienzpotenziale in allen Bereichen unterstellt, etwa durch die Nutzung von Recyclingbaustoffen, verbesserten

Rezyklatraten, Leichtbauweisen im Verkehr oder der Umstellung auf langlebigere Produkte.

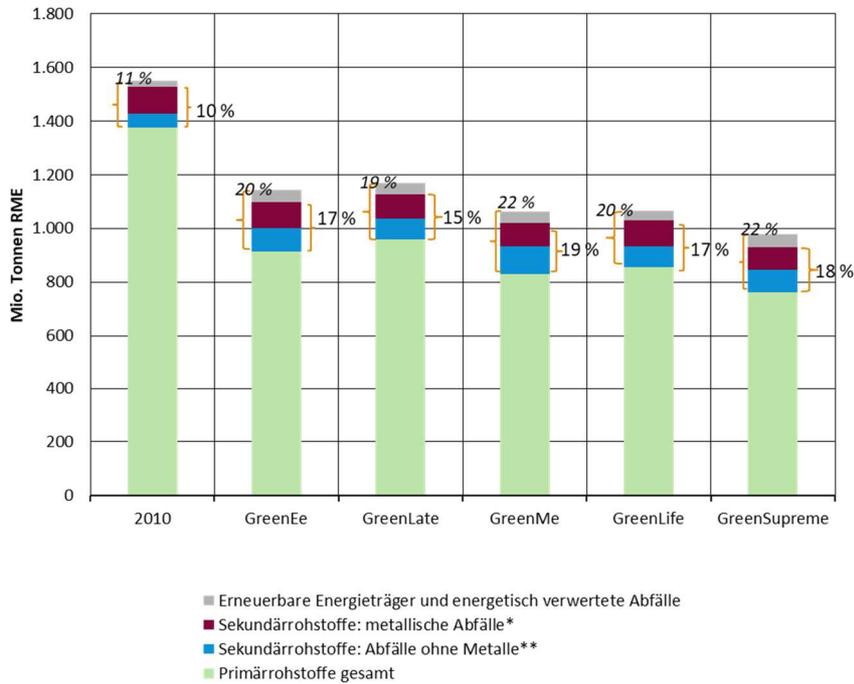
- GreenLife, Germany – resource efficient and GHG neutral – Lifestyle changes: In GreenLife wird analysiert, welchen Beitrag Verhaltensänderungen – ergänzend zu den Maßnahmen in GreenEe und GreenMe – zu Treibhausgasminderung und Ressourcenschonung leisten können. Dabei werden heute erkennbare Trends und ausgewählte Nischenansätze des umweltbewussten Verhaltens ambitioniert fortgeschrieben, etwa verstärktes Car- und Ride-Sharing.
- GreenSupreme, Germany – resource efficient and GHG neutral – Minimierung von THG-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum: Hier soll ein schneller Transformationspfad in Verbindung mit den wirksamsten Annahmen aus den vorgenannten Szenarien aufgezeigt werden, um die kumulierten Treibhausgasemissionen und Rohstoffinanspruchnahme zu verringern.

Die Details der Annahmen sind in Purr et al. (2019) und in Dittrich et al. (2020e) beschrieben. Nahezu alle der in Kapitel 3.3.2, 3.3.3 und 3.3.2 beschriebenen Steigerungspotenziale sind in einzelnen oder allen Szenarien in unterschiedlichem Ausmaß unterstellt. Zu berücksichtigen ist, dass nicht alle Sekundärrohstoffe in den Rechnungen enthalten sind. So sind beispielsweise die mengenmäßig sehr relevanten Basismetalle (Eisen- und Stahlschrott, Kupfer- und Aluminiumschrotte) enthalten, jedoch nicht die Recyclinganteile der Technologie- und Edelmetalle. Ebenso sind mineralische Sekundärrohstoffe enthalten, diese wurden konservativ abgeschätzt, closed loops¹ und Verfüllungen sind beispielsweise nicht enthalten. Würden diese Ströme zusätzlich quantifiziert und einberechnet werden, würde die berechnete Quote jeweils um weitere Prozentsätze steigen.

Die folgenden Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Substitutionsquoten in 2030 und 2050, ohne und mit Berücksichtigung der substituierten fossilen Rohstoffe. Es ist ersichtlich, dass die Substitutionsquote bis 2030 deutlich und bis 2050 sehr stark ansteigen könnte, wenn viele Faktoren zusammenkommen, die zu einem Anstieg der Rezyklateinsätze *und* einem Rückgang der Primärrohstoffnutzung führen. So liegt die Quote in 2030 zwischen 15 % und 19 %, in 2050 liegt sie zwischen 27 % und 38 %. Werden die substituierten fossilen Energieträger berücksichtigt, so liegt die Substitutionsquote in 2030 zwischen 19 und 22 % und in 2050 zwischen 40 und 48 %.

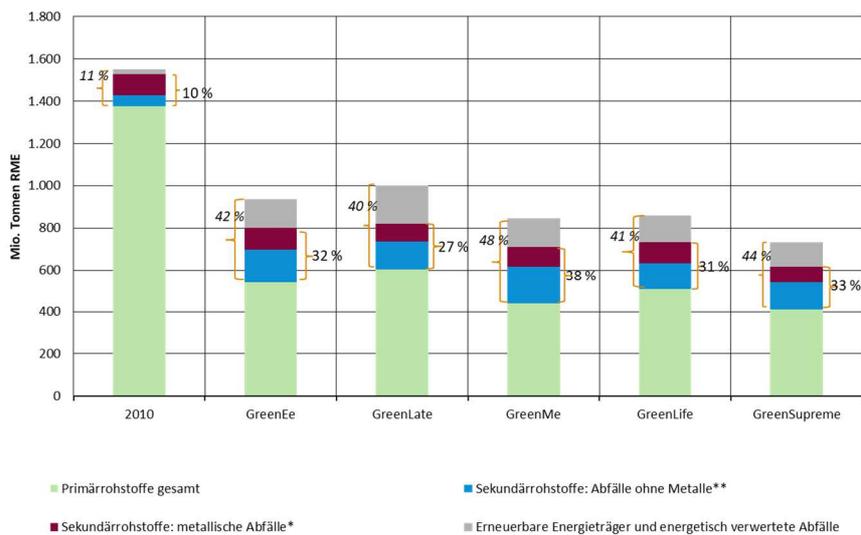
¹ Ein closed loop ist beispielsweise, wenn Straßenaufbruch direkt bei der Straßensanierung wieder eingesetzt wird.

Abbildung 21: Substitutionsquote in 2030 in verschiedenen Green-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von Purr et al. (2019) und Dittrich et al. (2020e); *Eisen, Kupfer, und Aluminium. **Stofflich verwertete Abfälle aus Holz, Papier, Kunststoffen und mineralische Abfälle zur Verwertung in Hochbau und im Tiefbau (ohne closed loops).

Abbildung 22: Substitutionsquote in 2050 in verschiedenen Green-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von Purr et al. (2019) und Dittrich et al. (2020e); *Eisen, Kupfer, und Aluminium. **Stofflich verwertete Abfälle aus Holz, Papier, Kunststoffen und mineralische Abfälle zur Verwertung in Hochbau und im Tiefbau (ohne closed loops).

4 Die Substitutionsquote

4.1 Definition und Kriterien für einen Einsatz

In diesem Kapitel steht die Substitutionsquote im Fokus. Eine Substitutionsquote ist definiert als Menge der Sekundärrohstoffe (mit oder ohne Vorketten), die im Wirtschaftskreislauf eingesetzt wird, im Verhältnis zur gesamten Rohstoffmenge (Primär- und Sekundärrohstoffe). Die Substitutionsquote kann auf der Ebene von Stoffströmen, Produkten oder auch auf gesamtwirtschaftlicher Ebene formuliert werden (siehe auch Kapitel 2.3 und 2.6). In diesem Kapitel werden sowohl die gesamtgesellschaftliche Substitutionsquote als auch ausgewählte produkt- bzw. rohstoffbezogene Substitutionsquoten untersucht. Bei der gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquote steht eine mögliche Ausgestaltung einschließlich Zielkorridore im Zentrum. Bei den ausgewählten Beispielen wird der Frage nachgegangen, ob eine Substitutionsquote ein hilfreiches Instrument sein kann, um die Nutzung von Sekundärrohstoffmengen zu steigern.

Kriterien

Eine Substitutionsquote kann unter folgenden Bedingungen ein sinnvolles Instrument sein:

- Wenn ökologisch unschädliche **Einsatzmöglichkeiten** für die Sekundärrohstoffe technisch existieren und gezielt ausgeweitet werden sollen. Eine Substitutionsquote nimmt Produktverantwortung stärker in den Blick.
- Wenn **ausreichend recycelte Rohstoff-/Produktmengen** zur Verfügung stehen oder unter dem gegebenen technischen Entwicklungsstand absehbar zur Verfügung stehen können. Je nach Transportaufwand sollte die Menge national oder regional zur Verfügung stehen.
- Wenn die erforderliche Sekundärrohstoffmenge erreichbar ist, ohne dass Stoffströme von einer **sinnvolleren Verwendung** (z.B. ReUse, Secondhand, Verwendungen, die höher in der Abfallhierarchie stehen) umgelenkt werden.
- Wenn der **Preis für Sekundärrohstoffe** höher als der Preis für Primärrohstoffe ist, und dadurch die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen gering ist, und eine Substitutionsquote dazu beitragen kann, zusätzliche Nachfrage zu generieren und Preiseffekte auszugleichen. Es ist gleichzeitig zu klären, ob die Preisdifferenz dadurch zu Stande kommt, dass Primärrohstoffe durch Subventionen gefördert werden oder Kostenvorteile durch nicht-eingepreiste ökologische Kosten entstehen. Anforderungen der internationalen Wettbewerbsfähigkeit können hierbei ebenso relevant sein.
- Wenn Abfälle oder (aufbereitete) Sekundärrohstoffe aufgrund von Absatzschwierigkeiten ins **Ausland verbracht** und dort nicht sachgerecht genutzt oder entsorgt werden, so kann eine Substitutionsquote im Inland beitragen, eine Verlagerung von Umweltbelastungen zu mindern und Verantwortlichkeit umzusetzen.
- Wenn **Nachweise** zum Einsatz von Sekundärrohstoffen von Produzenten erbracht werden können.

Substitutionsquote im engeren und weiteren Sinne

Laut Definition setzt eine Substitutionsquote nicht zwingend eine Rückführung der Sekundärrohstoffe in den gleichen Produktionsprozess bzw. in der gleichen Produktgruppe voraus („SQ im engeren Sinne“). Ebenso ist in Bezug auf die Definition eine Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe in anderen Bereichen/Produktgruppen möglich („SQ im weiteren Sinne“). Prinzipiell ist anzustreben, dass ein möglichst hochwertiges Recycling der Abfallstoffe durchgeführt wird und das wertgebende Potenzial der Rohstoffe erhalten bleibt. Wenn aus Plastikflaschen wieder Plastikflaschen statt Parkbänke hergestellt werden, wird das wertgebende Potenzial am ehesten erhalten. Im Sinne der Substitutionsquote sind jedoch beide Verwertungswege zulässig.

Die Substitutionsquote lässt per se keine Differenzierung zwischen einer hochwertigen und minderwertigen (Downcycling¹) stofflichen Verwertung zu. Je nach Ausgestaltung der Substitutionsquote werden etablierte Stoffströme beeinflusst und verschoben sich (ggf. je nach Materialverfügbarkeiten). Erst durch einen Vergleich aller Stoffstromverschiebungen kann *ceteris paribus* bewertet werden, ob die Substitutionsquote zu einer Minderung des Primärmaterialieinsatzes geführt hat, oder ob durch Verschiebungen in anderen Bereichen Einsparungen durch einen dort erhöhten Primärrohstoffeinsatz (über)kompensiert wurden. Zur Bewertung, welcher Weg eine ökologisch stärker entlastende Wirkung von Primärrohstoffen hat, können insbesondere Ökobilanzergebnisse herangezogen werden.

4.2 Gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote

Gemäß ProgRes II bzw. III sind die Indikatoren DERec und DIERec die zentralen Indikatoren, mit denen der Umfang des Sekundärrohstoffeinsatzes gemessen wird. Wie im Kapitel 2 gezeigt, werden mit diesen Indikatoren die theoretischen Mengen der eingesparten Primärmaterialien ohne oder mit Rohstoffrucksack gemessen. Eine konkrete Zielsetzung für eine Höhe oder Steigerungsrate eines zu erreichenden DIERec oder DERec existiert gegenwärtig nicht in Deutschland.

Die gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote geht einen Schritt weiter und setzt die eingesetzte Menge Sekundärrohstoffe in Beziehung zur gesamten Menge der eingesetzten Rohstoffe. Der Vorteil einer Substitutionsquote liegt darin, dass nicht nur der Substitutionserfolg quantifiziert, sondern zusätzlich auch der Anteil der Kreislaufwirtschaft oder Zirkularität am gesamten stofflichen Umsatz einer Ökonomie sichtbar wird. Eine Substitutionsquote ist eine Weiterentwicklung der CMU, denn anstelle des Anteils der einem Recycling zugeführten Abfälle als Proxy würde eine Substitutionsquote die tatsächliche Menge der genutzten Sekundärrohstoffe nutzen (siehe auch Kapitel 2).

Eine gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote kann zum Zwecke des Monitorings oder auch direkt mit einem konkreten politischen Ziel verknüpft werden. Das Monitoring könnte aufzeigen, ob die Richtung stimmt, das heißt, ob der Anteil der genutzten Sekundärrohstoffe

¹ Unter Downcycling fallen jene Recycling-Aktivitäten, bei denen die erzeugten Produkte eine minderwertigere Qualität und/oder Funktionalität aufweisen als das ursprüngliche Ausgangsprodukt. Ebenso fällt unter Downcycling, wenn die erneute Recyclingfähigkeit der Produkte nicht (mehr) gegeben ist. Ein Downcycling tritt tendenziell beispielsweise dann auf, wenn das Produkt nicht in den gleichen Produktionsprozess zurückgeführt wird, sondern etwa in anderen Branchen einen anderen Zweck erfüllt. Inwieweit die Funktionalität oder die Qualität der recycelten Produkte gemindert ist, muss allerdings im Einzelfall bewertet werden. Ein Downcycling ist insbesondere dann gerechtfertigt, wenn dies ökobilanziell eine Verbesserung ermöglicht und keine direkte Rückführung (oder nur unter erheblichen Aufwand) in den ursprünglichen Prozess möglich ist.

zunimmt. Ein konkretes Ziel kann festlegen, wie hoch der Anteil der gesamtwirtschaftlichen Substitution bis wann steigen soll.

Ausgestaltung einer gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquote

Bei der Ausgestaltung einer konkreten gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquote ist zu überlegen, wie die Sekundärrohstoffmengen und wie die Primärrohstoffmengen bemessen werden. Grundsätzlich sollten beide Größen die gleichen Systemgrenzen aufweisen und konsistent berechnet werden.

Die Sekundärrohstoffmengen sollten die Menge Sekundärrohstoffe quantifizieren, die tatsächlich genutzt wird, und nicht die Menge der Abfälle, die einem Recycling zugeführt werden (wie dies gegenwärtig bei der Berechnung der CMU als Proxy der Fall ist). Da es bei einer Substitutionsquote im Kern um den Umfang der substituierten, d.h. nicht-genutzten (eingesparte) Primärrohstoffe geht, ist es sinnvoll, die Menge der genutzten Sekundärrohstoffe in eingesparte Primärrohstoffe umzurechnen.

Die gesamtwirtschaftliche Menge der eingesetzten Primärrohstoffe kann gemäß Standards (siehe auch Kap 2.4. - Infobox) unterschiedlich gemessen werden:

- als direkter Materialinput (DMI), bestehend aus heimischer Entnahme und Importen (Importgewichte)
- als direkter Materialverbrauch (DMC), d.h. DMI abzüglich Exporte (Exportgewichte)
- als Rohstoffinput (RMI), bestehend aus heimischer Entnahme und Importe (Rohmaterialäquivalente)
- als Rohstoffverbrauch (RMC), d.h. RMI abzüglich Exporte (Rohmaterialäquivalente)

Da der DMI und der DMC den internationalen Handel und die heimischen Entnahmen unterschiedlich gewichtet, entsteht ein Ungleichgewicht. Daher wird, auch wenn die Rechnungen komplexer sind, die Nutzung des RMI und des RMC von Fachleuten normalerweise bevorzugt. In Deutschland und auch in Japan wird oftmals die sogenannte Produktionsperspektive bevorzugt, das heißt es wird der DMI bzw. der RMI bei der Berechnung der Gesamtrohstoffproduktivität genutzt. In anderen Ländern bzw. Regionen, darunter die EU, wird die Konsumperspektive, d.h. der DMC bzw. der RMC bevorzugt. Aus unserer Sicht ist beides gleichwertig begründbar.

Das heißt, eine gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote sollte im Zähler die genutzten Sekundärrohstoffmengen, umgerechnet in die substituierten Primärrohstoffe, und im Nenner die Gesamtmenge der genutzten Primärrohstoffe (RMI oder RMC) zzgl. substituierte Primärrohstoffe enthalten.

Weiterhin ist zu überlegen, wie der Handel verrechnet wird. In den klassischen gesamtwirtschaftlichen Materialanalysen werden Importe den heimischen Entnahmen hinzugerechnet und Exporte bei der Konsumperspektive abgezogen – hierdurch wird die Verantwortung des Konsums für die global gehandelten Stoffströme betont. Die im Kapitel 3 diskutierte und errechnete CMU geht etwas anders vor, indem sie Recyclinganstrengungen anders zuordnet: Importe werden nicht bei der Menge der Rezyklate (im Zähler) berücksichtigt, Exporte jedoch schon. Ein Land, das rezykliert, hat bessere Werte, als ein Land, das Sekundärrohstoffe importiert.

In der Praxis werden aufbereitete und nicht aufbereitete Sekundärrohstoffe gehandelt. Das heißt, der Aufwand, der bei der Aufbereitung entsteht, kann oftmals gar nicht eindeutig zugeordnet werden, wenn beispielsweise Sekundärrohstoffe oder Schrotte importiert und in Deutschland verarbeitet werden oder exportiert und im Ausland aufbereitet werden. Im Leitfaden zur Berechnung der CMU von Eurostat wird explizit darauf hingewiesen, dass auch die andere Zuordnung (Berücksichtigung der Importe, Abzug der Exporte) begründbar ist. Auch aus unserer Sicht sind beide Varianten denkbar und werden im Folgenden berücksichtigt.

Das heißt, aus unserer Sicht sind drei Varianten denkbar:

Variante 1: Konsumbezogene Perspektive, Verrechnung der Primär- und Sekundärrohstoffe in genutzte bzw. substituierte Rohmaterialäquivalente („Rohstoffrucksäcke“), Anrechnung Sekundärrohstoff-Importe und anteiliger Abzug Sekundärrohstoff-Exporte, Allokation vergleichbar RMC und damit gleichwertige Behandlung inländischer und ausländischer Recyclinganstrengungen bezogen auf den Konsum

$$\text{Substitutionsquote } V1 = \frac{\text{substituierte LIV}}{\text{LIV}_{\text{prim}} + \text{substituierte LIV}}$$

Variante 2: Produktionsbezogene Perspektive, Verrechnung der Primär- und Sekundärrohstoffe in genutzte bzw. substituierte Rohmaterialäquivalente („Rohstoffrucksäcke“), Anrechnung Importe, keine Verrechnung Exporte

$$\text{Substitutionsquote } V2 = \frac{\text{Substituierte (DE + Imp)}}{\text{RMI}_{\text{prim}} + \text{substituierte (DE + Imp)}}$$

Variante 3: Konsumbezogene Perspektive, Verrechnung der Primär- und Sekundärrohstoffe in genutzte bzw. substituierte Rohmaterialäquivalente („Rohstoffrucksäcke“), Anrechnung der heimischen Anstrengung ohne Importe unabhängig von Exporten und damit stärkere Betonung der inländischen Recyclinganstrengungen

$$\text{Substitutionsquote } V3 = \frac{\text{Substituierte (DE)}}{\text{LIV}_{\text{prim}} + \text{substituierte (DE)}}$$

Mögliche Zielkorridore für eine gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote

Ein Zielkorridor für eine gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote kann ausgehend von den Ergebnissen im Projekt RESCUE formuliert werden, da in dem Projekt eine große Breite an technisch machbaren Recyclinganstrengungen und gleichzeitig an rohstofflichen Einsparungen berücksichtigt wurden. Für einen Zielkorridor eignen sich das weniger ambitionierte GreenLate-Szenario als untere Grenze und das technisch orientierte und rohstofflich sehr ambitionierte GreenMe-Szenario als obere Grenze.

Im Projekt RESCUE wurde die Substitutionsquote nach der oben aufgeführten Variante 1 (gemessen mit Rucksäcken, aus der Konsumperspektive) berechnet. In dem Projekt wurden allerdings ambitionierte Annahmen zu technologischen Veränderungen im Ausland getroffen. Die Veränderungen im Ausland betreffen nicht nur Annahmen zum Recycling, sondern auch Annahmen zur Transformation der Energiesysteme und zu Effizienzsteigerungen in der Produktion und verändern die Größenordnung der Importe in Rohmaterialäquivalenten. Die Annahme wirkt sich in 2030 nur wenig (+ 1 %), jedoch in 2050 deutlich auf die errechnete

Substitutionsquote aus (+ 5-8 %). Die Veränderungen im Ausland wirken sich ferner auf die Rechenvariante 2 (in der die Importe eingehen) und 1 (mit Verrechnung von Im- und Exporten) stärker aus als auf die 3. Variante. Ebenso müssen die im RESCUE-Projekt nicht berücksichtigten Sekundärrohstoffströme zugeschätzt werden, was aufgrund der Datenlage mit Unsicherheiten verbunden ist.

In der folgenden Tabelle sind Zielkorridore genannt, die erreichbar sind, wenn eine ambitionierte klimapolitische und ressourcenschonende Transformation politisch gefördert und gesellschaftlich unterstützt wird. Die Korridore sind aufgrund der Unsicherheiten noch vergleichsweise groß. Eine erreichbare, ambitionierte bis sehr ambitionierte Zielsetzung für eine gesamtwirtschaftliche Substitutionsquote in 2030 in den Rechenvarianten 1 und 3 liegt bei etwa 20 % – 25 % und für die Rechenvariante 2 bei etwa 25 % - 30 %.

Tabelle 5: Zielkorridore für eine Substitutionsquote

		Aktuell einschließ- lich Schät- zungen	2030	2050
Variante 1	Konsumbezogene Perspektive, Substitution in Rohmaterialäquivalenten, Anrechnung Importe und anteilmäßige Anrechnung Exporte (Allokation vergleichbar RMC)	13 – 14 %	18 – 28 %	32 - 48 %
Variante 2	Produktionsbezogene Perspektive, Substitution in Rohmaterialäquivalenten, Anrechnung Importe, keine Verrechnung Exporte	18 - 20 %	24 -33 %	34 - 51 %
Variante 3	Konsumbezogene Perspektive, Substitution in Rohmaterialäquivalenten, Betonung heimischer Anstrengungen ohne Importe	12 – 13 %	17 – 27 %	33 - 49 %

Quelle: eigene Berechnungen

Zukünftige Handlungsschritte

Politisch: ProgRes III definiert keine Substitutionsquote, nennt jedoch das Verhältnis der eingesetzten Rezyklatmenge im Verhältnis zur gesamten genutzten Materialmenge. In ProgRes wird als Maß der DIERec / RMI genannt, das heißt, es fließen Anstrengungen im In- und Ausland in die Quote ein (ähnlich der Rechenvariante 2). Laut BMU (2020) beträgt die Quote auf der Basis von Forschungsprojekten 19 % in 2014. Eine konkrete Zielsetzung wird nicht genannt.

Es ist zu empfehlen, dass zukünftig eine konkrete, ambitionierte mittelfristige Zielsetzung für eine Substitutionsquote benannt wird. Aus unserer Sicht ist es dabei weniger relevant,

ob die Substitutionsquote produktions- oder konsumbasiert ansetzt. Relevanter ist eine ambitionierte Zielformulierung und eine konsequente Förderung der Sekundärrohstoffnutzung in allen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft.

Methodisch-konzeptionelle Aspekte: Gegenwärtig liegen zwei unterschiedliche Berechnungswege und zwei Berechnungen für Deutschland vor: (1) Im Projekt ReSek wurden bottom-up 30 Materialien ausgewählt und mit Ökobilanzdaten der kumulierte Rohstoffaufwand (netto) der substituierten Produkte berechnet. Dieser wurde in Beziehung mit den Berechnungen des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffeinsatzes von Destatis gesetzt. Das heißt, es wurden Daten aus zwei unterschiedlichen Denkschulen und Herangehensweisen verknüpft. Im Projekt ReSek wurde nach eigenen Aussagen im Allgemeinen darauf geachtet, dass möglichst zu Deutschland passende Prozesse aus ecoinvent genutzt wurden, eine Prüfung auf Konsistenz erfolgte jedoch nicht. (2) Im Projekt RESCUE wurde methodisch konsistenter vorgegangen, auch wenn weniger Sekundärrohstoffe berücksichtigt wurden. Im RESCUE-Projekt wurden mit URMOD, einem gesamtwirtschaftlichen Input-Output-Modell, die berücksichtigten Sekundärrohstoffe in Rohmaterialäquivalente umgerechnet. In Folge sind die Ergebnisse direkt mit den Primärrohstoffen vergleichbar.

Aus unserer Sicht ist das methodisch-konzeptionell konsistentere Vorgehen für die Bestimmung einer gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquote zu bevorzugen.

Empirische Aspekte: Sowohl im ReSek- als auch im RESCUE-Projekt konnten nicht alle Rezyklate berücksichtigt werden. Insbesondere bei den Baustoffen (Hochbau und Tiefbau) und bei den Technologiemetallen fehlen hinreichend abgesicherte Informationen. Beide Gruppen sind mengenrelevant. Die Datenlücken sollten zukünftig durch Forschungsprojekte bzw. statistische Ämter gefüllt werden.

4.3 Substitutionsquote für Produkte bzw. Stoffströme

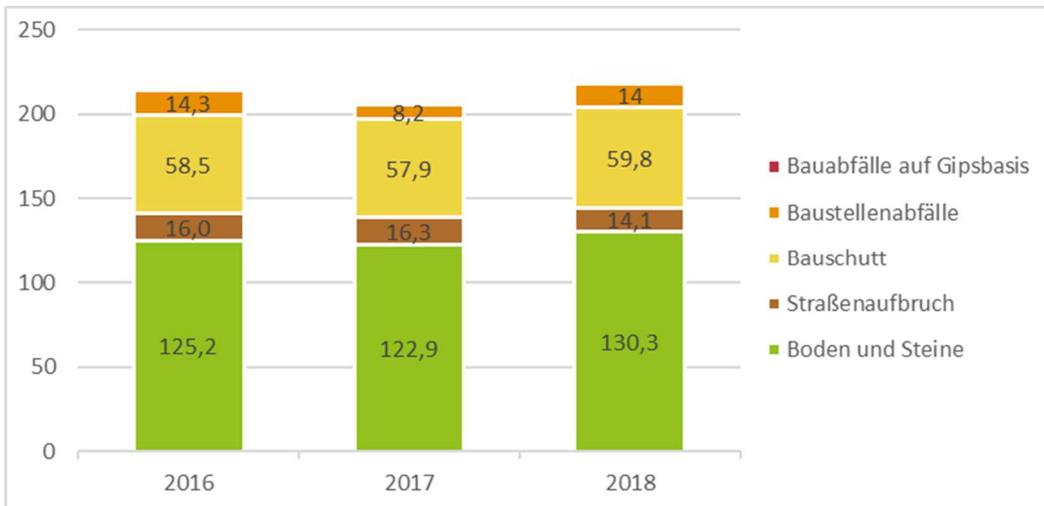
4.3.1 Baustoffe

Der Bausektor zählt zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren. In der EU entfällt etwa die Hälfte der geförderten Rohstoffe (mineralische Rohstoffe wie Steine, Kies, Sand und Ton) auf die Bauwirtschaft. Der Abbau dieser Rohstoffe ist mit erheblichen Eingriffen in den Natur- und Landschaftshaushalt verbunden. Jedes Jahr werden hierfür erhebliche Flächen beansprucht. Zugleich produziert der Bausektor mit großem Abstand das größte Abfallaufkommen (Knappe et al. 2017).

Bauabfälle fallen als Bauschutt, Straßenaufbruch, Boden und Steine sowie als Baustellenabfälle an. Bauabfälle auf Gipsbasis werden separat erfasst. Im Jahr 2018 lag die Gesamtmenge bei 218,6 Mio. t, in dem Jahr waren die mineralischen Bauabfälle einschließlich des Bodenaushubs – das sind Böden und Steine – mit 130,3 Mio. t die mengenmäßig wichtigste Abfallgruppe in Deutschland (siehe Abbildung 23). Gegenüber 2016 hat die Gesamtmenge an Bauabfällen 2018 um ca. 4 Mio. t zugenommen, was u.a. auf eine leicht gestiegene Aktivität der Abbrüche von Gebäuden oder der Sanierung von Straßen, Gleisen oder Tunneln hinweist¹. Die Verwertungs- und Recyclingquoten haben sich nur geringfügig geändert.

¹ <https://www.sonderabfall-wissen.de/wissen/immer-mehr-bauschutt-entsorgung-und-recyclingpotenzial/>

Abbildung 23: Erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle 2016-2018 in Mio. t



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von (Basten 2016, 2021; Destatis 2019a)

Mit etwa 59,8 Mio. t [57,9 Mio. t] in 2018 [2017] nimmt die Fraktion Bauschutt¹ etwa 27,3 % [28,1 %] der mineralischen Bauabfälle ein. Die Abfallfraktionen Bauschutt, Straßenaufbruch, sowie Baustellenabfälle weisen (mit Ausnahme der Gipsabfälle) überwiegend hohe Verwertungsquoten von ca. 86,2 – 98,7 % auf (siehe Tabelle 6). Dazu zählen jedoch auch niederwertige Verwertungsmaßnahmen wie der Deponiebau oder die Verfüllung von Abgrabungen. Eine aktuelle Studie des Umweltbundesamtes untersucht in diesem Kontext mögliche Ansätze zur Stärkung eines höherwertigen Recyclings von Bauprodukten.² Gegenüber dem Jahr 2016 haben sich Verwertungsquoten der sonstigen Verwertung und eines tatsächlichen Recycling nur geringfügig verändert. Im Straßenaufbruch fand 2018 vergleichsweise weniger hochwertiges Recycling statt, die restlichen Kategorien verzeichnen geringfügige Zunahmen unter 1 %.

¹ Bauschutt umfasst Stoffströme von Beton; Ziegeln; Fliesen, Ziegel und Keramiken, sowie Gemische Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramiken. Baustellenabfälle umfassen Holz, Glas, Kunststoffe, Metalle, Dämmmaterialien, sowie gemischte Bau und Abbruchabfälle.

² Link zur Studie: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/pruefung-moeglicher-ansaeetze-zur-staerkung-des>

Tabelle 6: Verwertungsquoten mineralischer Bauabfälle in 2018 und Veränderung gegenüber 2016 (%)

Bauabfallfraktion	Verwertungsquote (2018) in % (hoch- und minderwertige Verwertung) und Veränderung gegenüber 2016	Sonstige Verwertung (Veränderung gegenüber 2016)	Recycling (Veränderung gegenüber 2016)
Boden und Steine	86,2 (+0,1 %)	76,0 (-1 %)	10,2 (+0,9 %)
Bauschutt	93,9 (+0,1 %)	16,0 (-0,1 %)	77,9 (+0,2 %)
Straßenaufbruch	97,5 (-0,4 %)	4,3 (+1,8 %)	93,2 (-2,2 %)
Baustellenabfälle	98,7 (+0,1 %)	96,9 (-0,1 %)	1,8 (+0,1 %)
Bauabfälle auf Gipsbasis	49,6 (+5,0 %)	44,9 (+4,7 %)	4,7 (+0,3 %)

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Basten (2016, 2021)

Auf EU-Ebene bilden die EU-Abfallrahmenrichtlinie und die EU-Deponieverordnung die EU-weite Rahmengesetzgebung, welche mit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (2012) und der Deponieverordnung in deutsches Recht umgesetzt wurde. Die EU-Abfallrahmenrichtlinie (*Directive 2008/98/EC*) regelt die fünfstufige Abfallhierarchie sowie Recyclingquoten u. a. für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle. EU Mitgliedstaaten müssen seit 2020 für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle eine Recyclingquote von 70 % erfüllen. Abfallstromspezifisch kommen in Deutschland die Novelle der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfVO 2017) sowie die Ersatzbaustoffverordnung zum Tragen. Erstere schreibt u.a. die Getrennthaltung der beim Rückbau anfallenden Bau- und Abbruchabfälle vor (Buchert et al. 2017).

Im Folgenden wird anhand dreier mineralischer Bauabfallmaterialien untersucht, inwieweit Substitutionsquoten geeignet sind, um die Kreislaufführung dieser Rohstoffe zu fördern. Für die ausgewählten Beispiele Beton, Gips und Ziegel werden die in Kapitel 4.1 genannten Kriterien schrittweise analysiert.

4.3.2 Baustoffe 1: Altbeton

4.3.2.1 Einführung und Problematik

Beton findet im Hochbau als Fundament von Gebäuden oder im Ingenieurbau z.B. im Brücken- und Tunnelbau Einsatz, ebenso ist Beton im Tiefbau für den Straßen- und Kanalisationsbau ein wichtiger Baustoff. Gebrauchter Beton wird gemäß der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) den Bauschutten zugeordnet (27,3 % der gesamten mineralischen Bauabfälle). Bauschutte werden zu etwa 93,9 % recycelt, allerdings werden hiervon etwa 16 % in Deponien verbaut oder verfüllt („sonstige stoffliche Verwertung“) und 77,9 % vorwiegend im Tiefbau (Straßen- Wegebau) eingesetzt (Basten 2021).

Das Aufkommen von Altbeton aus Bau- und Abbruchabfällen (AVV 170101) betrug 2017 24,6 Mio. t (Destatis 2019a). Etwa 0,5 Mio. t (2 %) der Betonabfälle wurden in Form von RC-Gesteinskörnung zur Herstellung von Recycling-Beton, sogenanntem R-Beton, eingesetzt. Neben aufbereiteten Betonabfällen kann RC-Gesteinskörnung auch auf Basis weiterer mineralischer Bauabfälle (z.B. Mauerwerk, Steine) gewonnen werden. 2016 wurden 72,2 Mio. t RC-Gesteinskörnung erzeugt, das sind ca. 12,7 % der gesamten Gesteinskörnungen (567 Mio. t) (Basten 2021). Für 2018 zeichnet sich eine Absenkung der RC Gesteinskörnung um – 0,2 % ab (Basten 2021).

Neben dem Flächenverbrauch durch den Abbau mineralischer Baurohstoffe ist insbesondere die Produktion von Beton aus Primärmaterial stark klimawirksam. Relevante Rohstoffe oder Rezepturbestandteile für die Betonherstellung sind Kies, Sand, Wasser und Zement. Vor allem letzterer ist entscheidend für die Treibhausgasbilanz des Betonbaustoffs. Pro Tonne Zement werden etwa 587 kg CO₂-Äq emittiert, deren Ursache auf zwei zentrale Prozesse zurückzuführen ist: Für den Brennvorgang, bei dem das Ausgangsmaterial Kalkstein zu (Zement-)Klinker gebrannt wird, werden hohen Brenntemperaturen benötigt, welche einen hohen Brennstoffverbrauch (und energiebedingte Emissionen) verursachen. Weiterhin führt die chemische Reaktion der Entsäuerung des Kalksteins beim Brennen zu einer direkten Freisetzung von CO₂. In Deutschland werden jährlich etwa 27,5 Mio. t Zement verbraucht. Für Deutschland wird zwar von rückläufigen Prognosen für den Zementverbrauch ausgegangen, global hingegen kann vor allem aufgrund der Bevölkerungsentwicklung und Urbanisierungstrends eine Zunahme von 12 – 23 % im Vergleich zu 2014 erwartet werden. Der Bedarf für material- und klimaschonendere Produktvarianten, wie beispielsweise klimafreundlicheren Zement¹ zur Betonherstellung oder alternativen Baumaterialien ohne Zementanteile, ist daher begründet (WWF 2019).

Die Nutzung von recycelten mineralischen Bauabfällen zur Herstellung von sogenanntem R-Beton ist ein Ansatz, der einen wichtigen Beitrag zur Substitution von Primärmaterialien leisten kann. Im Folgenden wird untersucht, ob eine Substitutionsquote für Altbeton zur Substitution von Gesteinskörnungen geeignet ist.

4.3.2.2 Analyse der Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

Gebrochener Altbeton kann aufgrund seiner guten technischen und bauphysikalischen Eigenschaften im Baubereich erneut eingesetzt werden; z.B. als Frostschuttschicht für Fahrbahnbetone oder als Schottertragschicht. Durch die stoffliche Verwertung der Altbetone werden auf diese Weise Primärmaterialien substituiert. Lediglich ein Bruchteil des Altbetonaufkommens wird auf diesem Weg stofflich verwertet, der Großteil des Altbetons wird als Erdbaustoff für Verfüllungen genutzt. Eine weitere stoffliche Verwertung ist die Produktion von R-Beton für den Hochbau. Für die Produktion von R-Beton kommen als Sekundärrohstoffe sogenannte RC-Gesteinskörnungen zum Einsatz. RC-Gesteinskörnungen setzen sich u.a. aus aufbereiteten mineralischen Bauabfällen wie Altbeton zusammen und ersetzen auf diese Weise Primärmaterialien wie Naturstein. Der Einsatz der RC-Gesteinskörnung für die Produktion von sogenanntem R-Beton für den Hochbau ist problemlos möglich ist, es

¹ Neben mineralischen Bauabfällen werden z.B. bereits Hüttensande zur Substitution von Zementklinkern substituiert. Auch Ziegelsande kommen zum Einsatz (siehe Kap 4.3.4)

bestehen bereits legislative Regelungen. Beim Einsatz von R-Beton bedarf es keinerlei Änderungen in der Planung oder in der Bemessung von Gebäuden. (ifeu Heidelberg gGmbH 2019a)

Die zulässigen Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung verschiedener R-Beton Typen (GK Typ 1 und 2) variieren zwischen ≤ 25 bis maximal 45 Vol.% (gemäß DIN EN 12620, DIN 4226-101 und DIN 4226-102)¹. Für RC GK Typ I kommt 90 % Altbeton und 10 % aufbereitetes Mauerwerk zum Einsatz, für RC GC Typ II ist ein Mischverhältnis von 70 % Altbeton und 30 % aufbereitetes Mauerwerk vorgegeben. An R-Beton werden die gleichen Eigenschaftsanforderungen gestellt wie an Beton aus konventioneller Herstellung (Verwendung von ausschließlich Primärmaterialien) (ifeu Heidelberg gGmbH 2019a).

Das derzeit noch geltende Regelwerk für R-Beton-Rezepturen basiert auf dem Stand der Technik eines Forschungsvorhabens aus den 1990er Jahren. Die Weiterentwicklung der technischen Ausstattung und Getrennthaltung von Bauschutt lässt mittlerweile jedoch weitaus höhere Anteile an RC-Gestein für R-Beton zu. In einem durch das BMBF geförderten Forschungsprojekt wurden systematisch technische Möglichkeiten zur Steigerung des Einsatzes von rezyklierten Gesteinskörnungen (RC-GK) in Beton- wie auch Zementrezepturen erprobt (Heidelberger Zement AG et al. n.d.). Dabei wurde darauf geachtet, die üblichen Produkteigenschaften zu wahren (Knappe et al. 2017).

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass eine Erhöhung des Anteils von RC Gesteinskörnungen von 45 % auf 60 % (bei Größtkorn 16 mm) oder 64 % (bei Größtkorn 22 mm) technisch möglich ist (Knappe et al. 2017)². Eine Erhöhung des RC-Anteils ist mit einer Substitution von Primärmaterial gleichzusetzen. Die Überarbeitung des bestehenden Regelwerks ist gerade in der Vorbereitung und wird 2021 als Entwurf vorliegen (Knappe et al. 2017).

Kriterium 2: Ausreichende Mengen vorhanden?

Zur Verwertung verfügbare Altbetone fallen beim Rückbau oder bei Sanierungen im Tief- und Hochbau an, z.B. von Straßenfahrbahnen oder Bauwerken. Altbeton liegt je nach Bereich als Monofraktion oder in Kombination mit anderen Baustoffen vor; der Altbetonanteil der Bauschuttmassen liegt in Deutschland bei schätzungsweise > 50 Gew. %. Die 2017 in Kraft getretene Novellierung der Gewerbeabfallverordnung schreibt vor, dass Altbeton auf Baustellen von anderen Bauabfallfraktionen getrennt gehalten werden muss, was in der Praxis auch umgesetzt wird. Der Mehraufwand der Getrennthaltung wird in der Regel durch reduzierte Entsorgungskosten kompensiert (ifeu Heidelberg gGmbH 2019a).

Gemäß der Abfallstatistik von Destatis lag das Aufkommen von Beton aus Bau- und Abbruchabfällen 2017 bei 24,6 Mio. t (AVV 170101) (Destatis 2019a). Laut dem Informationszentrum Beton GmbH werden etwa 0,5 Mio. t Betonabbruch zur Herstellung von R-Beton eingesetzt (Informationszentrum Beton GmbH n.d.). Demnach werden aktuell lediglich 2 % der Betonabfälle dieser hochwertigen Verwertungsoption zugeführt.

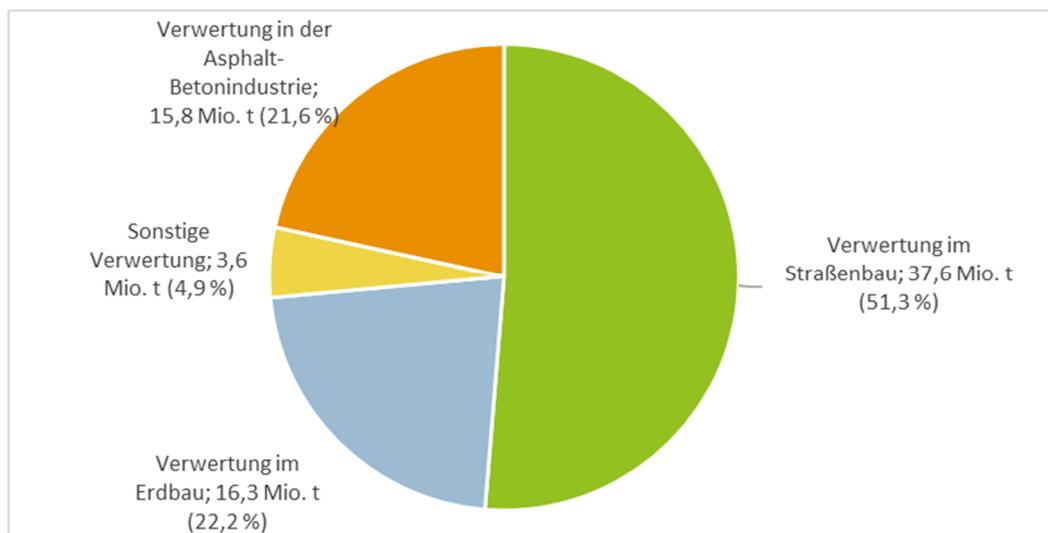
¹ Für Spannbeton und viele Verkehrsbauwerke ist R-Beton nicht zugelassen.

² Der für die Zielsetzung entwickelte Beton wurde auch in der Praxis für die Errichtung eines Waagenhauses der Fa. Schief in Winnenden eingesetzt, produziert vom Frischbetonwerk Winnenden. Hierfür war eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) durch das RP Tübingen notwendig, die auf eine im Rahmen des Projektes erstellte Begutachtung [10] durch Hr. Prof. Breit von der MPA der TU Kaiserslautern fußte. Für den Beton wurde nach 28 Tagen im Mittel eine Druckfestigkeit von 41,3 N/mm² und damit der Zielwert von 40 N/mm² eingehalten.

Ein Blick auf die Verwertung der erzeugten Menge an RC-Gesteinskörnung bestätigt dieses Bild. 2018 wurden 73,3 Mio. t RC-Gesteinskörnung erzeugt. Lediglich 1/5 der Menge fließt in die Asphalt- und Betonherstellung, wobei erstere deutlich dominiert. Etwa 75 % der RC-Gesteinskörnung wird direkt im Straßenbau oder Erdbau verwendet. Die hochwertige Verwertung von RC-Gesteinskörnung im Hochbau ist quasi noch nicht existent.

Die verfügbare RC-Gesteinskörnung, die in Aufbereitungsanlagen u.a. aus überwiegend Beton und Mauerziegel hergestellt werden, macht etwa 12,5 % des gesamten Bedarfs an Gesteinskörnung aus (587,4 Mio. t) (Basten 2021). Prinzipiell wird zwischen vier unterschiedlichen RC-Gesteinskörnungen unterschieden, je nach Zusammensetzung der jeweiligen Bestandteile (wie z.B. auch Putz, Mörtel, poröse Schlacke, Bimsstein, oder Asphalt oder weitere Fremdbestandteile, u.a. Glas, Keramik).

Abbildung 24: Verwertung der Recycling Baustoffe (RC Gestein) in 2018 in Mio. t (und %)



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Basten (2021)

Die Abfallstatistik von Destatis lässt eine erste Abschätzung über die potenziell mögliche Menge an RC-Gesteinsmaterial aus Altbeton und aufbereitetem Mauerwerk zu, welche für die Herstellung von R-Beton genutzt werden kann (Destatis 2019a). Wird angenommen, dass eine GK Typ II (70 % Altbeton und 30 % aufbereitetes Mauerwerk) produziert würde, dann könnten basierend auf aktuellen Abfallmengen ca. 35,09 Mio. t RC-GK Typ II (ca. 6 % der GK in 2017) erzeugt werden¹ (bzw. ca. 27,29 Mio. t RC-GK I; ca. 5 % der GK in 2017).

Ein weiteres Mengenpotenzial liegt in den gemischten Bauschuttabfällen; Gemische aus Beton, Ziegel, und Keramiken belaufen sich 2017 auf 27 Mio. t; etwa 50 % Gew. % davon sind Altbeton (13,5 Mio. t). Investitionen in technische Ausstattungen (z.B. Bagger mit Spezialwerkzeugen) ermöglichen eine höhere Getrennthaltung und damit Bereitstellung sortenreiner und recyclingfähiger Sekundärrohstoffe. Das Unternehmen Heinrich Fees GmbH etwa erreicht durch aufwändige Verfahren beim Abriss auf Recyclingquoten von Bauschutt von

¹ Abfallstatistik (2017): Beton (AVV 170101): ca. 24.562 kt sowie Mauerwerk (AVV 170107): ca. 27.340 kt. Das RC GK Typ II Verhältnis führt zu 24.562 kt Beton und 10.527 kt Mauerwerk = 35.089 kt RC Gestein (Typ II) (Destatis 2019a)

bis zu 90 Prozent; das Unternehmen wurde 2016 mit dem Umweltpreis ausgezeichnet (Fromm 2020; Heinrich Feess GmbH & Co. KG 2016, 2021).

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendung?

Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und geschlossener Materialkreisläufe ist die Priorisierung von RC-Gesteinskörnung als Sekundärmaterial für die R-Betonherstellung etablierten Downcycling-Aktivitäten vorzuziehen.

Rückgewonnener mineralischer Bauschutt (darunter auch Beton) wird 2016 zu 78 % für minderwertige Funktionen im Tiefbau als Auffüllmaterial zur Stabilisierung im Tief- und Wegebau genutzt. Das Potenzial einer hochwertigen werkstofflichen Verwertung wie etwa der Herstellung von R-Beton, bleibt dadurch ungenutzt. Die Downcycling-Praxis impliziert einen weiterhin steigenden Primärrohstoffbedarf aufgrund des anhaltenden Baubooms im Hochbau (bvse Fachverband Mineralik - Recycling und Verwertung 2019).

Eine Substitutionsquote würde je nach Ausgestaltung eine schrittweise Umlenkung von Altbeton vom Straßenbau (niederwertigere Verwertung) in den Hochbau bewirken. Der Wegfall der Betonmengen im Straßenbau kann als unproblematisch eingestuft werden. Gemäß ifeu Heidelberg gGmbH (2019a) sinkt der Bedarf an Baumaterial für die Sanierung und Unterhaltung von Straßen, wodurch der Baustoffbedarf weitestgehend bereits aus dem Altmaterialien aus dem Straßenbau selbst gedeckt werden kann. Auch umweltpolitisch ist eine rückläufige Entwicklung der Neutrassierung von Straßen gewollt. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass durch eine Substitutionsquote für Altbeton ein Anstieg der Primärmaterialverwendung für den Straßenbau erfolgt (ifeu Heidelberg gGmbH 2019a).

Kriterium 4: Preisverzerrungen vorhanden?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

Kriterium 5: Auslagerung Umweltbelastung ins Ausland?

Baustoffe werden aufgrund des Gewichts und des damit verbundenen Transportaufwandes nur wenig international gehandelt. Bei Altbeton hat das Kriterium 5 für die Bewertung einer Substitutionsquote keine Relevanz, da mineralische Bauabfälle aufgrund des Gewichts kaum exportiert werden.

Kriterium 6: Nachweis möglich?

RC-Gesteinskörnungen unterliegen den gleichen DIN-Normen (DIN EN 12620, DIN 4226-101 und DIN 4226-102) und damit dem gleichen Eignungsnachweis wie jede andere Gesteinskörnung, die für die Herstellung von Beton vorgesehen ist. Betonhersteller können dies mit einem entsprechenden Zertifikat nachweisen. Die Verwendung einer RC-Gesteinskörnung muss nach einer Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton¹ aus den Lieferscheinen ersichtlich sein, die Betonrezepturen sind dem Bauherren auf Verlangen vorzulegen (Knappe et al. 2017).

¹ DAFStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, 2010-09

4.3.2.3 Abschließendes Fazit

Auf Grundlage der untersuchten Kriterien (siehe Kapitel 4.3.2.2) lässt sich abschließend empfehlen, dass eine Substitutionsquote für RC-Gesteinskörnung zur Herstellung von R-Beton geeignet ist, um Primärrohstoffe zu schonen. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie eine hochwertige stoffliche Nutzung von Altbeton den derzeit etablierten Downcycling-Aktivitäten vorzuziehen. Die stoffliche Verwertung von Altbeton zu RC-Gesteinskörnung hat eine substituierende Wirkung, insbesondere durch die Entlastung des Primärrohstoffbedarfs für die Betonherstellung für den Hochbau.

Das maximale Potenzial zur Herstellung von RC-GK Typ II aus Altbeton (und aufbereitetem Mauerwerk) liegt bei etwa 35 Mio. t/a. Zur Ausgestaltung der Substitutionsquote kann das bereits geltende (und derzeit in Überarbeitung befindliche) Regelwerk (DAfStb-Richtlinie Beton) zur Beimischung von RC-GK für die R-Betonherstellung genutzt werden. Demnach wäre eine Substitutionsquote zwischen 25 – 45 % für RC-Gestein denkbar. Je nach Verfügbarkeit der RC-Gesteinskörnungsmengen kann die Quote schrittweise erhöht werden. Bei der Ausgestaltung der Substitutionsquote müssen verfügbare bzw. nicht verfügbare Mengen von RC-Gestein jedoch berücksichtigt werden und regionale Ausnahmeregelungen (z.B. gegen Nachweise) möglich sein.

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 7: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Beton

	Eignung SQ	Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+	Zur Erhaltung des wertgebenden Potenzials von Altbeton gibt es mit der Produktion von R-Beton einen geeigneten Einsatzbereich. Technisch könnten hier weitere Potenziale als das derzeit bestehende Regelwerk erlaubt ausgeschöpft werden. In der Praxis zeigt sich, dass die Betonindustrie für den Einsatz von RC-Gesteinskörnung offen ist und vereinzelte Unternehmen sogar diesen ressourcenschonenden Beton entsprechend gezielt bewerben (ifeu Heidelberg gGmbH 2019a). Unter Berücksichtigung von Transportentfernungen ist die Verwendung von RC-Gesteinskörnung insbesondere in Ballungsräumen bereits heute eine ökonomische und ökologische Alternative zu Kies oder gebrochenen Primärgestein, welche häufig nur aus weiteren Entfernungen bezogen werden können (Knappe et al. 2017).
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	+	Es stehen ausreichende Altbetonmengen für den verstärkten Einsatz von R-Beton im Hochbau zur Verfügung. Das maximale Potenzial zur Herstellung von RC-GK (Typ II) liegt basierend auf den aktuellen Altbetonmengen bei 35 Mio. t. Von Bedeutung ist, dass RC-Gesteinskörnung neben Altbeton auch aus aufbereitetem Mauerwerk besteht und daher diese Mengenpotenziale auch genutzt werden können. Ein weiteres Potenzial liegt in einer Verstärkung der Getrennthaltung von Altbeton beim Abriss von Gebäuden etwa durch Spezialwerkzeuge. Der Anteil von Altbeton in gemischten Bauschutt beläuft sich ca. auf 13,5 Mio. t. Ein sortenreine Getrennthaltung beim Abriss sowie durch eine vorausschauende Planung und Berücksichtigung des Entsorgungskonzepts bereits bei Baubeginn begünstigt die verfügbare Menge recyclingfähiger Baumaterialmengen (hier Altbeton).
Kriterium 3) Sinnvollere	+	Eine Substitutionsquote bewirkt eine Umlenkung der Altbetonmengen zur Verwertung im Hoch- statt Tiefbau. Insbesondere im Straßenbau bzw. bei Straßensanierung ist nicht davon auszugehen,

	Eignung SQ	Erläuterung
Anwendun- gen?		dass bisherige Altbetonmengen durch Primärmaterial ersetzt werden müssen, da der Materialbedarf weitestgehend bereits aus dem Altmaterialien des Straßenbaus selbst gedeckt werden kann.
Kriterium 4) Preisverzer- rungen?	k. A.	Nicht analysiert
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	k. A.	Baustoffe werden aufgrund des Gewichts und des damit verbundenen Transportaufwandes nur wenig international gehandelt. Das Kriterium hat daher keine Relevanz. .
Kriterium 6) Nachweis- pflicht mög- lich?	+	Ein Nachweis für RC-Gesteinskörnung kann vom Hersteller erbracht werden

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.3 Baustoffe 2: Gips

4.3.3.1 Einführung und Problematik

Der jährliche Gipsverbrauch in Deutschland liegt aktuell bei etwa 10 Mio. t (BUND 2020a). Derzeit wird die Nachfrage nach Gips noch zu über der Hälfte (ca. 60 %) aus der Rauchgasentschwefelung (REA-Gips, 6 Mio. t) aus der fossilen Energiewirtschaft gedeckt. 40 % des Bedarfs wird mit Naturgips (ca. 4 Mio. t) gedeckt. Etwa die Hälfte des Gipses (ca. 5 Mio. t) wird in einer Vielzahl von Bauprodukten (v.a. Gipskarton- und Gipsfaserplatten für den Innenausbau) eingesetzt, etwa 1,7 Mio. t kommen in der Zementindustrie zum Einsatz (ifeu Heidelberg gGmbH 2019c).

Gips unterliegt beim Rückbau oder Abbruch von Gebäuden einer Getrenntsammlungspflicht und wird gemäß der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) separat als Bauabfälle auf Gipsbasis ausgewiesen. Im Jahr 2018 fielen 0,64 Mio. t Gipshaltiger Abfälle an. Vom Aufkommen der Bauabfälle auf Gipsbasis in 2018 waren etwa 4,7 % (0,03 Mio. t) recyclingfähig (z.B. keine Fremdanteile und Verunreinigungen) und wurde durch eine stoffliche Verwertung zu Gipsplatten recycelt. Etwa 44,9 % (0,29 Mio. t) wurden einer (minderwertigen) sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt, welche auch Verfüllungen umfasst. 0,32 Mio. t (50,4 %) wurden (z.B. aufgrund von Verunreinigungen) beseitigt (Basten 2021).

Die Produktion von REA-Gips wird mittelfristig stark zurückgehen, da zur Erreichung der Klimaschutzziele Braun- und Steinkohlekraftwerke ausgeschaltet werden. Die natürlichen Gipsvorkommen befinden sich häufig in sensiblen Naturschutzgebieten. Um den Druck auf die natürlichen Gipsvorkommen nicht zu erhöhen, kann das Recycling von Gips einen wichtigen Beitrag liefern und Versorgungsengpässe abdämpfen (ifeu Heidelberg gGmbH 2019c)..

Vor diesem Hintergrund wird folglich geprüft, ob eine Substitutionsquote für Gips geeignet und sinnvoll ist.

4.3.3.2 Analyse der Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

Verfügbare Recyclinggips fließt in die Gipsindustrie. Derzeit wird RC-Gips vorwiegend bei der Herstellung von Estrichbindemittel (Fließestriche) oder in der Zementindustrie als Sulfatträger verwendet. Eine direkte Rückführung in die Produktion von Gipsplatten erfolgt aktuell nur geringfügig, obwohl dies zur Erhaltung des wertgebenden Potenzials des Baustoffs anzustreben ist. Für die Herstellung von Gipskartonplatten gilt derzeit eine technische Grenze von 30 Gew.-% RC-Gips, die potentiell als Substitut verwendet werden könnten (ifeu Heidelberg gGmbH 2019c). Bezogen auf die aktuell genutzte Menge Gipskartonplatten von 3 Mio. t bedeutet dies, dass fast 1 Mio. t Recyclinggips genutzt werden könnten. Zum Vergleich: 2015 wurden in Deutschland weniger als 20.000 t RC-Gips produziert (Buchert et al. 2017).

Eine Herausforderung beim Einsatz von RC-Gips sind Störstoffe. Gipsabfälle weisen aufgrund ihres Einsatzes in Gebäuden Fremddanteile und Verunreinigungen auf. Je nach Produkt unterscheiden sich Gipsgehalte in Gew.-% sowie Recyclingfähigkeit (ifeu Heidelberg gGmbH 2019c). Bei einem geringen Störstoffanteil der Gipsabfälle lassen sich die hohen Qualitätsanforderungen für den Einsatz von RC-Gips in der Gipsindustrie jedoch erfüllen (ifeu Heidelberg gGmbH 2019c) und weisen zudem ökobilanziell aufgrund des Feuchtegehalts deutliche Vorteile gegenüber REA-Gips auf.

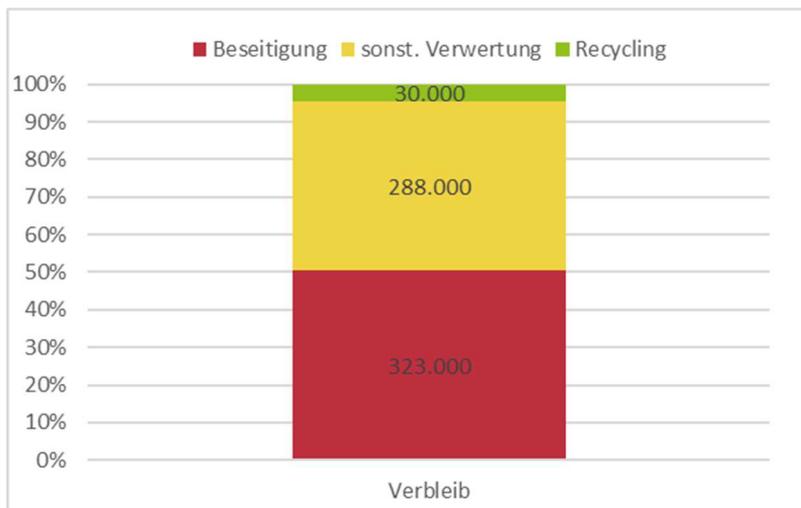
Kriterium 2: Ausreichende Mengen vorhanden?

Gipskartonplatten sind die häufigste Anwendung für Gipsprodukte und beim Rückbau von Gebäuden auch die wichtigste potentielle Versorgungsquelle für das Gipsrecycling (Buchert et al. 2017). Von den jährlich rund 280.000 t Gipskartonplatten in den Bauabfällen gelten 210.000 t als recyclingfähig. Buchert et al. gehen von einem wachsenden Aufkommen aus, das bis 2030 je nach Szenario auf etwa 0,55 bis 1,1 Mio. t recyclingfähigem Gipsmaterial steigen wird (Buchert et al. 2017).

Gemäß der Novelle der Gewerbeabfallverordnung unterliegen Baustoffe auf Gipsbasis (Abfallschlüssel 17 08 02) einer Getrenntsammlungspflicht. Die gipshaltigen Abfälle müssen nach Vorgabe des KrWG (§ 8 Absatz 1) vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zugeführt werden. Bauabfälle mit Gipsverunreinigungen unterliegen höheren Entsorgungspreisen als Bauabfälle ohne Gipsverunreinigungen, da aufgrund einer möglichen Sulfatbelastung durch Gips die Verwertung anderer mineralischer Bauabfälle eingeschränkt ist. Anreize einer sorgfältigen Getrennthaltung von Gipsabfällen sind daher bereits vorhanden (ifeu Heidelberg gGmbH 2019c).

Abbildung 25 zeigt die Verwertungspraxis der in 2018 verfügbaren gipshaltigen Abfallmengen. 0,64 Mio. t gipshaltige Abfälle standen zur Verfügung, davon wurden nur 0,03 Mio. t zu Gipskartonplatten recycelt (Basten 2018), was einer Recyclingquote von 4,7 % entspricht. Insbesondere die Menge, die einer sonstigen Verwertung (Verfüllung) zugeführt wird, stellt ein Potenzial für die Gewinnung von RC-Gips dar.

Abbildung 25: Verbleib von Bauabfällen auf Gipsbasis, 2018 (in t)



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Bastein (2018)

Derzeit gibt es fünf Recyclingstandorte, die Relevanz des Recyclingsektors ist demnach in Deutschland noch gering. Gipsrecycling ist in benachbarten Ländern stärker verankert, darunter in Frankreich (RQ = 15,2 %), den Niederlanden (RQ = 40,4 %), Dänemark (RQ ca. 60 %) oder auch UK (RQ = 21,7 – 42 %) (Buchert et al. 2017).

Aktuelle Hemmnisse, die die Ausweitung der Gipsrecyclinginfrastruktur behindern, sind u.a. noch fehlende bzw. nicht ausreichend differenzierte Regelungen für den selektiven Rückbau von Gebäuden bzw. der konsequenten Getrennthaltung (von Gipskartonplatten) von Abfallfraktionen über den gesamten Entsorgungsweg hinweg (Alwast 2020; ifeu Heidelberg gGmbH 2019c). Alwast (2020) weist darauf hin, dass bereits bei der Bauplanung das Design und die Möglichkeit der zukünftigen Verwertung der (Gips-)Baulemente und Materialien stärker berücksichtigt werden muss. Ebenso muss vor Gebäuderückbau durch Aufstellung eines Materialinventars und Audits durchgeführt und entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um verwertbare gipshaltige Bauteile und Materialien besser separieren zu können (Alwast 2020).

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendungen?

Die Entsorgung- und Verwertungspraxis von Gips (siehe Abbildung 25) zeigt, dass etwa 40 % (0,26 Mio. t) einer sonstigen Verwertung zugeführt werden. Die derzeitige Verfüllung der Gipsabfälle wird als sonstige Verwertung eingeordnet und bildet aktuell den wirtschaftlichsten Weg der Gipsverwertung. Hierzu gehören auch Exporte nach Tschechien, wo die Gipsabfälle als Stabilisierungsmaterial zur Verfüllung uranhaltiger Schlammteiche eingesetzt werden (jährlich etwa 100.000 t lt. Buchert et al., 2017). Buchert et al. (2017) bewerten den Einsatz als physikalisch-technisch ungeeignet und potenziell gesundheitsgefährdend (Buchert et al. 2017), Alwast Consulting (2020) fordert einen sofortigen Stopp. Der Verwertungsweg der Verfüllung steht der Abfallhierarchie entgegen, eine Aufbereitung in Gips-Recyclinganlagen wäre eine höherwertige und daher zu bevorzugende Verwendung.

Kriterium 4: Preisverzerrungen vorhanden?

Mehr als die Hälfte der Gipsabfälle (55 %, siehe Abbildung 25) wird auf Deponien entsorgt. Niedrige Entsorgungspreise für die Deponierung von Gipsabfällen sind eine Ursache dafür, dass nur geringe Anteile der Gipsabfälle vorhandenen Aufbereitungsanlagen zugeführt werden. Eine deutliche Erhöhung der Entsorgungskosten für die Deponierung, wie sie beispielsweise in anderen europäischen Ländern bestehen (z. B. Frankreich, Niederlanden, Dänemark, Schweden), ist ein wichtiger Schritt, der gegangen werden muss, um die Grundlage für eine ausbaufähige Gipsrecyclinginfrastruktur in Deutschland zu ermöglichen (Buchert et al. 2017; ifeu Heidelberg gGmbH 2019c). Die o.g. Exporte von Gipsabfällen werden im tschechischen Ausland zu Dumpingpreisen angenommen (Buchert et al. 2017).

Die günstigen Verwertungswege im Ausland sowie niedrige Deponiegebühren sind Hemmnisse, die dazu beitragen, dass große Mengen an Inputmaterial Gips-Recyclinganlagen nicht zur Verfügung stehen.

Kriterium 5: Verlagerungen ins Ausland?

Die bereits angesprochenen Verbringungen von Gipsabfällen ins Ausland zur Verfüllung von Seen ist aus technischer und ökologischer Sicht problematisch. Der Export stellt einen billigen Verwertungsweg dar. Eine Substitutionsquote kann (unabhängig von anderen geeigneteren Instrumenten) Anreize geben, Gipsabfälle nicht zu exportieren, sondern in Deutschland zu recyceln.

Kriterium 6: Nachweis möglich?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

4.3.3.3 Abschließendes Fazit

Eine Substitutionsquote ist ein geeignetes Instrument, um die Nutzung von Recyclinggips zu fördern und die Nutzung von Naturgips zu mindern.

Eine wenn auch noch kleine Gips-Recyclinginfrastruktur ist bereits vorhanden, deren Kapazitäten verstärkt ausgenutzt werden sollten. Durch eine Substitutionsquote wird die Nachfrage nach RC-Gips angeregt, was eine wichtige Rahmenbedingung für die bereits existierenden zwei Anlagen sowie geplante Recyclinganlagen bedeutet. Gipsrecycling trägt zur Minderung des Extraktionsdrucks von Primärgips in oftmals geschützten Gebieten bei und kann zukünftig sinkende REA-Gipsmengen zumindest teilweise ersetzen. Prinzipiell wird durch den Wegfall von REA-Gips die Substitution von Gipsplatten durch Baustoffe, wie Holzbau-, Lehm- oder Strohbauplatten, sowie Platten aus Korkplatten oder Holzwolle-Leichtbauplatten für den Innenausbau an Bedeutung gewinnen (Alwast 2020).

Vor dem Hintergrund der Abfallhierarchie sollte die Verfüllung von störstofffreien bzw. –armen Gipsabfällen vermieden und stattdessen einer stofflichen Verwertung im engeren Sinne zugeführt werden. Eine Substitutionsquote kann die Umlenkung dieser Ströme bewirken und Gipsrecycling als ökonomische Alternative zu sonstigen stofflichen Verwertungspraktiken etablieren. Eine Substitutionsquote kann ferner dazu beitragen, technisch und ökologisch fragwürdige Verwendungen von Gipsabfällen im Ausland zu mindern.

Eine Substitutionsquote sollte aufgrund der (mittel bis langfristig) limitierten Verfügbarkeit an recyclingfähigem Material zunächst niedrig angesetzt werden und schrittweise erhöht werden. Technische Fortschritte zum möglichen Gewichtsanteil von RC-Gips in Gipskartonplatten könnten eine Orientierung zur Anhebung der Quote darstellen.

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 8: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Gips

	Eignung SQ	Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+	Einsatzbereiche für störstofffreie bzw. -arme Gipsabfälle sind vorhanden. Ein Einsatzbereich stellen Gipsplatten dar, das derzeitige technische Limit zur Produktion von recycelten Gipskartonplatten liegt bei 30 Gew.-% RC-Gips, dieses Einsatzpotenzial ist bei Weitem nicht ausgeschöpft.
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	o / -	2015 standen etwa 0,21 Mio. t recyclingfähiges Gipsmaterial zur Verfügung. Lediglich ein Bruchteil wurde für eine hochwertige stoffliche Verwertung verwendet. Mittelfristig wird bis 2030 eine Menge an recyclingfähigem Gipsmaterial von 0,55 bis 1,1 Mio. t erwartet.
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	+	Die dominierende Verwertungspraxis von recyclingfähigen Gipsabfällen ist die Verfüllung, lediglich 5 % der recyclingfähigen Gipsabfälle werden bislang stofflich und damit höherwertig verwertet.
Kriterium 4) Preisverzerrungen?	+	Die Gebühren für die Deponierung von Gipsabfällen sind im internationalen Vergleich gering.
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	+	Eine Substitutionsquote kann Anreize geben, technisch und ökologisch fragwürdige Verwertungen von Gipsabfällen im Ausland zu minimieren.
Kriterium 6) Nachweispflicht möglich?	k. A.	Nicht analysiert

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.4 Baustoffe 3: Ziegel

4.3.4.1 Einführung und Problematik

Ein weiterer Baustoff von Bedeutung im deutschen Wohnungsbau sind Ziegel aus gebranntem Ton, die als Dach und Mauerziegel eingesetzt werden. Dabei ist ein rückläufiger Trend zu beobachten. 2018 wurden etwa 598 Mio. t Stück Dachziegel und 7.242 Tsd. m³ Mauerziegel sowie Ziegel für Boden und Straßenbeläge in Deutschland produziert (Basten 2019), etwa 20 % der Produktion wird ins EU Ausland exportiert (ifeu Heidelberg gGmbH 2019b). Jährlich fallen etwa 10 Mio. t Altziegel durch Rückbau- und Abbruchaktivitäten als Bauschutt an; etwa 4,9 Mio. t davon sind sortenreine Ziegel, weitere 5,5 Mio. t sind Mauerziegel und mit Wandbaustoffen verunreinigte Ziegel (Destatis 2019a).

Um eine Frostbeständigkeit und eine lange Lebensdauer von Ziegeln zu gewährleisten, muss Lehm bei hohen Temperaturen gebrannt werden (>1000 Grad Celsius). Die Ziegelherstellung ist daher energieintensiv; 2017 belief sich die Energieverbrauchsbereitstellung für Ziegelbrennprozesse etwa 20,7 PJ. Die Energiebereitstellung durch Kohle und Erdgas verursacht CO₂-Emissionen; für einen Quadratmeter Fassade basierend auf Mauerziegeln werden zwischen 50 – 90 CO₂-Äq emittiert¹(Basten 2019; Petersen Tegl 2019; Pfoh et al. n.d.). Primärenergie für die Herstellung kann bei Wärmedämmziegeln durch die Verwendung von recycelten Materialien wie Sägemehl, Papierfasern, oder Polystyrol für die Porosierung genutzt werden (Pröll 2020).

Für die Produktion wurden 2017 etwa 11,4 Mio. t Ziegelton in Deutschland extrahiert (Basten 2019). Eine Erhöhung von Sekundärrohstoffen in der Ziegelproduktion würde eine Entlastung der Tonabbaugebiete und einer Ressourcenschonung bewirken. Daher wird untersucht, inwieweit eine Substitutionsquote als Instrument für Ziegel geeignet ist.

4.3.4.2 Analyse der Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

Aus technischen Gründen ist eine direkte Rückführung von altem Ziegelmaterial in den erneuten Herstellungsprozess nur bedingt möglich, denn Ton kann nur einmal gebrannt werden. In der Regel wird hauptsächlich Ausschussmaterial aus dem Produktionsprozess oder aus dem pre-consumer Bereich einem erneuten Herstellungszyklus zugeführt. Eine Substitution von Primärmaterial in der Ziegelproduktion ist daher lediglich im pre-consumer Bereich bis max. 20 – 30 Gew. % möglich, eine Substitution von bereits genutzten Ziegel für die Ziegelerstellung ist aufgrund ihrer Bestandteile und physikalischen Eigenschaften für einen erneuten Einsatz in der Ziegelproduktion nicht möglich (EU-Recycling 2017; ifeu Heidelberg gGmbH 2019b).

Der mengenmäßig größte Anteil von Altziegeln wird zurzeit noch im Straßen- und Wegebau für gebundene oder ungebundene Deckschichten eingesetzt. Der Einsatz im Sport- und Tennisplatzbau wird ebenso praktiziert; vorwiegend aus Brennbruch aus hartgebranntem Dachziegel, Vormauerziegel und Klinker (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2020; Oebecke 2020; Pröll 2020).

¹ Umfasst einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und berücksichtigt Erstellung, Erneuerung und Entsorgung.

Zur Umwandlung von Altziegel in andere Produkte ist ein möglichst sortenreiner Abbruch oder Rückbau Voraussetzung, sowie die Aufbereitung in einer Baustoff-Recyclinganlage (Pröll 2020).

Für sortenreinen Ziegel besteht die Möglichkeit als Bestandteil der recycelten Gesteinskörnung für die Betonherstellung eingesetzt zu werden. Je nach RC-GK Betontyp variieren die maximal zulässigen Anteile; so sind maximal 10 Gew. % für Typ 1 und maximal 30 Gew. % für Typ 2 zulässig. Dieser Verwertungsweg kann vor dem Hintergrund des hohen Rohstoffbedarfs der Betonindustrie zukünftig an Bedeutung gewinnen. Ein legislativer Rahmen (DAFStb-Richtlinie Beton) hierfür besteht bereits seit der Jahrtausendwende (Knappe et al. 2017; UBA 2019b).

Ein weiterer Verwertungsweg existiert als Ausgangsstoff für Vegetationssubstrate im Garten und Landschaftsbau. Durch konventionelle Aufbereitungstechniken kann sortenrein erfasstes Ziegelmaterial aus dem Wohnungsrückbau beispielsweise zur Substratherstellung eingesetzt, soweit sie den Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) (BMELV 2012) entsprechen (Roth-Kleyer 2018). Durch ambitioniertere Aufbereitungstechnologien können auch verunreinigte Dach- und Mauerziegel stofflich verwertet und für die Substratherstellung eingesetzt werden (ifeu Heidelberg gGmbH 2019b; Pröll 2020). Durch eine dezentrale Herstellung von Ziegel-Substraten, die u.a. eine hohe Wasserspeicherkapazität aufweisen, können Primärmaterialien eingespart sowie Transportwege minimiert werden (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2020; Oebecke 2020).

Kriterium 2: Ausreichende Mengen verfügbar?

Bei der Dach- und Mauerziegelherstellung fallen jährlich etwa 1 - 3 % sortenreiner Brennbruch an; das sind etwa 200.000 bis 300.000 Tonnen. (Oebecke 2020) Etwa ein Drittel dieser Produktionsabfälle werden aufgemahlen und als Magerungsmittel wieder der Rohstoffmischung zur Produktion zugegeben. Je nach Art des Tonvorkommens und der Produktion können maximal 20 - 30 Gew.-% Primärrohstoffe ohne Qualitätsverlust substituiert werden (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2020; EU-Recycling 2017; Pröll 2020). Im Sinne der Abfallhierarchie sollte dies weitergeführt werden. Ein weiteres Drittel des Brennbruchs wird als Ziegelsand auf Sportplätzen (28 %), im Straßenbau (4 %) oder Vegetationsbau (3 %) sowie als Pflanzensubstrat genutzt. Etwa 27 % (ca. 54.000 - 81.000 t) des Brennbruchs wird in Gruben zur Füll- und Wegebefestigung eingesetzt (EU-Recycling 2017). Ein geringes Mengenpotenzial für eine höherwertige Verwertung bietet demnach sortenreiner Brennbruch, der bislang in Gruben zur Verfüllung genutzt wird. Wie oben beschrieben, kann sortenreiner Ziegel als Zuschlagstoff für R-Beton Anwendung finden; Brennbruch wird hierfür derzeit nicht eingesetzt (EU-Recycling 2017).

Der mengenmäßig bedeutendere Anteil Altziegel fällt bei Rückbau- und Abbruchaktivitäten als Bauschutt an. Im Jahr 2017 wurden etwa 4,9 Mio. t Abfälle aus sortenreinen Ziegeln (nach der Abfallverzeichnisverordnung) erfasst. Weiterhin werden 5,5 Mio. t Mauerziegel und mit Wandbaustoffen verunreinigte Ziegel über die Abfallkategorie „Gemische aus Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik“ erfasst, welche die Hälfte des deutschen Bauschuttaufkommen ausmacht (vgl. Abbildung 23) (Destatis 2019a). Bauschuttgemische werden meist im Straßenbau für Deckschichten eingesetzt.

Neue Entwicklungen in der Trenn- und Sortiertechnik lassen jedoch erwarten, dass zukünftig noch größere Mengen Ziegel sortenrein erfasst werden können und damit einer höherwertigen Verwertung zugeführt werden können. (EU-Recycling 2017; Oebecke 2020) Mineralische Störanteile aus Putz und Mörtel, können in größeren Aufbereitungsanlagen durch

Trenn- und Sortiertechnik, wie etwa Farberkennung und Nahinfrarottechnik nahezu sortenreine Fraktionen erzeugen. (Pröll 2020) Technologien zur Trennung von gemischtem Bauschutt sollten für einen wirtschaftlicheren Einsatz weiterentwickelt und gefördert werden. (EU-Recycling 2017)

Kriterium 3: Sinnvollere Anwendungen?

Bei fachgerechter manueller Ab- und Wiedereindeckung können Tondachziegel wiederverwendet werden. Die Wiederverwendung ist im Sinne der Abfallhierarchie einer stofflichen Verwertung vorzuziehen. Es liegen keine Daten zur Menge wiederverwendeter Dachziegeln in Deutschland vor. (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2020)

Die Rückführung von Produktionsabfällen aus der Ziegelherstellung (Brennbruch) von bis zu 30 Gew.-% in die Ziegelherstellung sollte fortgeführt und weiter ausgeschöpft werden, um Primärmaterial zu ersetzen. (Pröll 2020)

Ein noch nicht ausgeschöpftes großes Potenzial bietet die Beimischung von rezyklierten Ziegelgesteinskörnungen für die R-Beton Herstellung. Die aufbereitete RC-Gesteinskörnung substituiert Primärrohstoffe wie Kies oder gebrochenes Gestein. Der legislative Rahmen ist durch die DAfStb-Richtlinie Beton bereits etabliert (siehe auch Kapitel 4.3.2.2). (Knappe et al. 2017; UBA 2019b)

Das Potenzial hierfür kann durch eine Substitutionsquote als Instrument besser ausgeschöpft werden, insbesondere vor dem Hintergrund, dass Ausschreibungen für Bauvorhaben die Verwendung von R-Beton noch zu selten einbeziehen (EU-Recycling 2017). Vorreiter ist der Berliner Senat, der im Rahmen einer Verwaltungsvorschriftsänderung für ein umweltverträgliches Beschaffungswesen die ausschließliche Verwendung von RC-Baustoffen (z.B. Ziegelsplitt) als Substitut für Natursteine verbindlich vorschreibt. (Oebecke 2020; SenUVK n.d.)

Kriterium 4: Preisverzerrungen vorhanden?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

Kriterium 5: Auslagerung Umweltbelastung ins Ausland?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

Kriterium 6: Nachweis möglich?

RC-Gesteinskörnungen unterliegen den gleichen DIN-Normen (DIN EN 12620, DIN 4226-101 und DIN 4226-102) und damit dem gleichen Eignungsnachweis wie jede andere Gesteinskörnung, die für die Herstellung von Beton vorgesehen ist. Betonhersteller können dies mit einem entsprechenden Zertifikat nachweisen. Die Verwendung einer RC-Gesteinskörnung muss nach einer Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton¹ aus den Lieferscheinen ersichtlich sein, die Betonrezepturen sind dem Bauherren auf Verlangen vorzulegen (Knappe et al. 2017).

¹ DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, 2010-09

4.3.4.3 Abschließendes Fazit

Ziegel eignen sich aufgrund ihrer Bestandteile und physikalischen Eigenschaften nicht für einen erneuten Einsatz in der Ziegelproduktion. Lediglich Produktionsausschüsse aus dem Herstellungsprozess (Brennbruch) werden erneut in kleinen Anteilen in die Ziegelproduktion zurückgeführt. Eine direkte Rückführung von gebrauchten Altziegeln in die Ziegelproduktion zur Substitution von Primärmaterialien ist daher aufgrund technischer und physikalischer Grenzen nicht möglich. Eine Substitutionsquote im engeren Sinne (Rückführung in Produktion) ist nicht geeignet.

Eine Substitutionsquote im weiteren Sinne, die etwa den Ersatz von Primärmaterial für die Betonherstellung anstrebt, ist durchaus sinnvoll und umsetzbar. Für Ziegel empfiehlt sich, das noch ungenutzte Potenzial einer hochwertigen Verwertung durch Einsatz als Bestandteil der RC-Gesteinskörnung für die R-Betonherstellung auszuschöpfen. Die Substitutionsquote kann sich hier an den maximal zulässigen Gewichtsanteilen von Ziegeln für RC-Gesteinskörnung für R-Beton orientieren; für Typ I 10 Gew. % und Typ II 30 Gew. % (Knappe et al. 2017; UBA 2019b).

Eine Substitutionsquote würde einen sicheren Absatzmarkt für sortenreinen Ziegel (z.B. als RC-Gesteinskörnung) schaffen und damit Investitionen in aufwändigere Aufbereitungs- und Sortiertechniken begünstigen, welche weitere Mengenpotenziale bislang nicht sortenreiner Ziegelmengen ermöglichen. Eine verstärkte Zuführung von Ziegel in die Betonherstellung kann je nach Ausgestaltung der Quote eine Umlenkung von minderwertigeren Verwertungswegen (wie etwa im Straßen und Wegebau, oder Verfüllungen) bewirken.

Eine Substitutionsquote von sortenreinem Ziegel für Vegetationssubstrate im Garten- und Landschaftsbau ist ebenso denkbar, da damit primäre Naturstoffe wie Lava, Bims und Ton ersetzt werden (ifeu Heidelberg gGmbH 2019b). Wesentlich hierfür ist ebenso, dass Anreize für einen ambitionierten selektiven Rückbau und Aufbereitungsanlagen geschaffen werden, um weitere Mengenpotenziale für sortenreinen Ziegel zu eröffnen.

Tabelle 9: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Ziegel

Eignung SQ		Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+/o	<p>Brennbruch aus der Ziegelherstellung kann zwischen 20 - 30 Masse % erneut dem Herstellungsprozess zugeführt werden und damit Primärmaterial substituieren.</p> <p>Sortenreine Altziegel können nach ihrer Verwendung zu neuen Produkten recycelt und nach Aufbereitung beigemischt werden. Mögliche hochwertige Einsatzbereiche sind RC-Gesteinskörnung für die R-Beton Herstellung und Vegetationssubstrate. Ebenso wird Altziegel als Ziegelsplitt im Wege- und Straßenbau und für Tennis und Sportplätze eingesetzt.</p>
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	+/o	<p>Technisch lassen sich durch Aufbereitungs- und Sortieranlagen nahezu sortenreine Fraktionen aus Bauschutt gewinnen. Etwa 5,5 Mio. t (2017) bislang gemischte Ziegelabfälle könnten auf Basis aktueller Abfallmengen demnach zukünftig sortenrein vorliegen und hochwertig verwertet werden.</p> <p>Ein geringes Mengenpotenzial liegt in etwa 50.000 – 83.000 t sortenreinem Brennbruch, der für niederwertige Verfüllungen, etwa in Gruben, genutzt wird.</p>

Eignung SQ		Erläuterung
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	+	Die Verwertung von sortenreinem Ziegel als Baustoff für RC-Gesteinskörnung für die Herstellung von R-Beton im Hochbau sollte stärker ausgenutzt werden. Eine Substitutionsquote ist bei entsprechender Ausgestaltung ein geeignetes Instrument, um einen Mindestanteil an RC-Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton umzusetzen. (siehe Tabelle 7)
Kriterium 4) Preisverzerrungen?	k. A.	Nicht analysiert
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	k. A.	Nicht analysiert
Kriterium 6) Nachweispflicht möglich?	+	Die Substitution von natürlichen Gesteinskörnungen durch gütegesichertes RC-Ziegelmaterial ist standardgemäß möglich (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. 2020); ein Nachweis für RC-Gesteinskörnung kann vom Hersteller erbracht werden.

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.5 Erden/Komposte, biotische Abfälle, Substrate

4.3.5.1 Einführung und Problematik

Jährlich fallen fast 10 Mio. t Bioabfälle an, etwa 4,4 Mio. t Bioabfälle in Biotonnen und weitere 5,6 Mio. t Grüngut, bestehend aus Garten- und Parkabfällen (Destatis 2020c, Zahlen für 2018). Hinzu kommen weitere biotische Abfälle, beispielsweise aus der Landwirtschaft, der Lebensmittelproduktion, Gastronomie und Handel. Die biotischen Abfälle werden in Bioabfallbehandlungsanlagen unter anderem zu Komposten verwertet. Nach UBA (2021) wurden in 2018 aus rund 15 Mio. t biotischer Abfälle 7,3 Mio. t Komposte hergestellt.

Komposte unterscheiden sich hinsichtlich ihres Reifegrades, der Zusammensetzung und des Nährstoffgehalts. Qualitätskomposte, die beispielsweise mit dem RAL Gütezeichen zertifiziert sind, enthalten keine oder sehr wenige Fremdstoffe. Die Nährstoffgehalte resultieren aus den Ausgangsstoffen, so sind Komposte aus Bioabfall im Allgemeinen nährstoffreicher als solche aus Grüngutabfall. In Folge eignen sich unterschiedliche Komposte für verschiedene Einsatzbereiche. Komposte werden überwiegend in der Landwirtschaft genutzt, aber auch in Erdenwerken sowie im Garten- und Landschaftsbau oder im Hobbygartenbau.

In 2018 wurden 72 % der aus Grüngut hergestellten Komposte und 83 % der Biogutkomposte mit dem RAL-Gütesiegel zertifiziert. Rund 58 % davon wurden in der Landwirtschaft eingesetzt, 20 % in Erdenwerken, 2 % im Erwerbsgartenbau und 7 % im Hobbygartenbau (Bundesgütegemeinschaft Kompost 2020; Luyten-Naujoks 2019).

Gleichzeitig werden etwa 10 Mio. m³ Torf jedes Jahr in Deutschland abgebaut, um daraus qualitativ hochwertige Substrate herzustellen (BMEL 2019). Alleine 2/3 davon werden im

Erwerbsgartenbau für Böden und zur Pflanzenzucht eingesetzt, etwa 1/3 bei Hobbygärtnern. Etwa 3 Mio. m³ torfhaltige Blumenerde werden jährlich in Deutschland in Gartencentern verkauft. Deutschland hat in der EU die höchste Verwendung (absolut) von Torf (Stand 2008) (BMEL 2019).

Die Verwendung von Torf im Gartenbeet und in Blumentöpfen ist jedoch äußerst kritisch zu betrachten. 60 % der europäischen Moore wurden primär durch den Torfabbau zerstört, bereits in 50 Jahren könnten die deutschlandweiten Torfvorräte erschöpft sein. Moore leisten einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz, da sie große Mengen an Kohlenstoff speichern. Durch den Abbau des Torfes und seiner Verwendung in Blumen- und Gartenbeeten werden die gespeicherten Mengen Kohlenstoff als Kohlendioxid emittiert. Erwerbsgartenbauer und Hobbygärtner leisten damit einen ungewollten Beitrag zum Treibhauseffekt (NABU n.d.).

Auch in Bezug auf den Naturschutz spielen Moore eine wichtige Rolle. Torflagerstätten haben eine hohe ökologische bzw. naturschutzfachliche Bedeutung; die sensiblen Ökosysteme bieten wichtige Lebensräume für Flora und Fauna und sind damit für den Erhalt der Biodiversität schützenswert. Eine Substitution von Torf für Pflanzerden ist daher nicht nur sinnvoll, sondern auch notwendig. Die Minderung der Torfnutzung im Gartenbau ist Teil des Klimaschutzplanes 2050 sowie des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung (Gruda 2019).

Bereits auf dem Markt erhältliche Ersatzprodukte bzw. Substitutionsmöglichkeiten für Torf sind Rindenumus, Holzfasern, Kokosfasern oder Chinaschilf (BUND 2020b; NABU 2016). Auch Komposte haben ein Potenzial, Torf zu substituieren (Luyten-Naujoks 2019). Vor diesem Hintergrund wird untersucht, ob eine Substitutionsquote für Komposte aus biotischen Abfällen in der Erdenproduktion ein geeignetes Instrument ist, um insbesondere den Einsatz von Torf zu reduzieren.

4.3.5.2 Analyse Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

Ausgangsstoffe für Komposte sind die Bioabfälle. Grundsätzlich ist für eine hochwertige Verwertung im Sinne des KrWG wichtig, dass bereits bei der Sammlung von Bioabfall Anteile von Fremdstoffen (z.B. Kunststoffe) vermieden werden (Knappe et al. 2019). Etwa 50 % der Bio- und Grüngutmassen, die einer Verwertung übergeben werden, bleiben nach der Behandlung (und Umsetzung eines Teils der organischen Substanz) als Kompost übrig und lassen sich entsprechend vermarkten. Im Allgemeinen sind Abfälle aus der Biotonne nährstoffreicher als Grünschnitt. Daher eignen sich Komposte aus der ersten Abfallfraktion grundsätzlich besser für einen Einsatz in der Landwirtschaft und Komposte aus der zweiten Abfallfraktion für Einsätze im Gartenbau (Knappe et al. 2012).

Der Einsatz von Komposten (Fertig- und Frischkomposte) in der Landwirtschaft dient als organisches Düngemittel. Komposte liefern zum einen Pflanzennährstoff und tragen zum anderen durch den hohen Anteil an organischer Substanz zur Neubildung von Humus in Böden bei. Kompost kann als organischer Dünger mineralische Düngemittel substituieren. 2016/2017 wurden beispielsweise etwa 1,7 Mio. t Stickstoffdünger und 0,2 Mio. t Phosphatdünger in Deutschland verbraucht (Industrieverband Agrar e.V. 2018). Zertifizierte Komposte sind insbesondere für den ökologischen Landbau attraktiv, da der Einsatz mineralischer Düngemittel nicht erlaubt ist (Knappe et al. 2019).

Ein Einsatzbereich für nährstoffärmere Komposte ist die Anwendung als Substrat für Pflanz- und Blumenerde. Fertigkomposte können zu Erden und Substraten weiterverarbeitet („veredelt“) werden. Veredelter Kompost lässt sich aufgrund höherer Erlöse (als für Komposte mit geringem Reifegrad) gut vermarkten (Knappe et al. 2015)¹. Die Möglichkeit zur Veredelung von Kompost besteht unabhängig davon, ob Fertigkomposte aus der reinen Kompostierung oder aus der sogenannten Nachrotte von Vergärungsrückständen aus Biogasanlagen stammen (Knappe et al. 2019).

Der Einsatz von Kompost als Substitut für Torf steht in Konkurrenz zu anderen Torfersatzstoffen oder ergänzt diese. Gegenwärtig wird mit unterschiedlichen Ersatzstoffen in unterschiedlichen Zusammensetzungen und Anwendungen in Forschung und Praxis experimentiert (bspw. BMEL 2019). Nicht jeder Kompost ist als Torfersatz in der Erdenproduktion geeignet. Als geeignet gelten sogenannte Substratkomposte (Luyten-Naujoks 2019), das sind „Fertigkompost[e] mit begrenzten Gehalten an löslichen Pflanzennährstoffen und Salzen, geeignet als Mischkomponente für Kultursubstrate“ (Bundesgütegemeinschaft Kompost n.d.). Die Qualitätsanforderungen, beispielsweise an Hygiene, Rottegrad, Fremdstoffanteile oder Pflanzennährstoffgehalte, wurden von Fachinstitutionen und Forschungseinrichtungen erarbeitet und sind Grundlage für Produktstandards der Substratkomposte der Bundesgütegemeinschaft Kompost. Es gibt zwei Typen Substratkomposte, die sich hinsichtlich ihrer maximalen Nährstoff- und Salzgehalte unterscheiden. Die Bundesgütegemeinschaft empfiehlt für Typ 1 (mit geringeren Nährstoff- und Salzgehalten) einen Anteil von bis zu 40 Vol-% im Substrat und für Typ 2 einen Anteil von bis zu 20 Vol-%. (Bundesgütegemeinschaft Kompost n.d.).

Im Hobbygartenbau sind die Anforderungen an die Qualitäten der Erden und Substrate geringer. Daher plädieren NABU (2021) und weitere Umweltschutzorganisationen wie der BUND (2018) oder Aktion Moorschutz (2021) mit Aktionen wie „Torffrei gärtnern“ dafür, vollständig auf Torf zu verzichten.

Kriterium 2: Ausreichende Mengen verfügbar?

Komposte, die bei der Erdenproduktion eingesetzt werden, müssen anwendungsbezogene Qualitätsanforderungen erfüllen. Komposte, deren Güte nachgewiesen ist, sind geeigneter als Komposte ohne Nachweis. In der Erdenproduktion sowie im Garten- und Landschaftsbau werden nährstoffarme und strukturreiche Komposte bevorzugt eingesetzt.

Gegenwärtig werden rund 96 Tsd. m³ gütegesicherte Substratkomposte hergestellt, die sich für anspruchsvolle Anwendungen (z.B. im Profigartenbau) eignen. Darüber hinaus werden etwa 780 Tsd. m³ RAL-Fertigkomposte produziert, die nicht auf alle Kriterien der Substratkomposte geprüft werden, jedoch als substratfähig gelten und in der Erdenproduktion (in Blumenerden mit Anteilen von 20 Volumen-%) eingesetzt werden können. (Luyten-Naujoks 2019)

Diese Mengen gütegesicherter Substratkomposte könnten gesteigert werden, indem

- die Mengen der gütegesicherten Komposte erhöht werden, von 72 % (Grüngutkomposte) bzw. 83 % (Biogutkomposte) auf bis zu 100 %, und ferner die Menge der gütegesicherten Substratkomposte erhöht wird;

¹ In Baden-Württemberg gibt es einige Kompostierungsanlagen, die wirtschaftlich erfolgreich hochwertige Produkte aus Kompost vertreiben.

- die Mengen der gesammelten biotischen Abfälle erhöht wird. Der Anteil von organischen Abfällen im Hausmüll (Restmülltonne) liegt bei etwa 39,3 Gew.% (Dornbusch et al. 2020). Das sind knapp 50 kg pro Person und Jahr bzw. 4,15 Mio. t insgesamt;
- Komposte aus Vergärungsanlagen nachbehandelt werden; gegenwärtig werden Verfahren entwickelt, mit den die nährstoffreichen Komposte durch Nachrotte und Nährstoffentzug Struktur- und Nährstoffeigenschaften erreichen, die einen Einsatz als Substrat zulassen (Luyten-Naujoks 2019). 2018 wurden insgesamt 3,6 Mio. t Gärreste und kompostierte Gärreste produziert (UBA 2021).

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendung?

Wie oben beschrieben, wird der Großteil der Komposte in der Landwirtschaft genutzt, und nur ein geringer Teil in der Erdenproduktion und im Garten- und Landschaftsbau. Knappe et al. (2019) leiten zentrale Empfehlungen und Ansatzpunkte zur optimierten und hochwertigen Verwertung von Bioabfällen u.a. vor dem Hintergrund einer Substitution von Torf ab. Die Autoren empfehlen eine kombinierte energetisch-stoffliche Nutzung von Bioabfällen. Im Sinne des KrWG soll zunächst eine Vergärung zur Biogaserzeugung und anschließend eine stoffliche Nutzung der Gärreste erfolgen. Über eine solche Kaskadennutzung kann eine Mehrfachnutzung sichergestellt und das wertgebende Potenzial der Bioabfälle möglichst ausgeschöpft werden. Für eine hochwertige Verwertung der Komposte und Gärrückstände wird u.a. die Produktion von Fertigkompost und dessen Vermarktung außerhalb der Landwirtschaft empfohlen.

Produktion und Nutzung von Torf hat ein Treibhausgaspotenzial von 250 kg CO_{2-Äq}/m³, Komposte liegen zwischen 40 und 85 kg CO_{2-Äq}/m³ (Stucki 2019). In Kaskadennutzung verwertete Bioabfälle mit Kompostierung ergeben aufgrund der Substitution von Torf und fossilen Energieträgern aus ökobilanzieller Betrachtung sogar eine Gutschrift, d.h. Treibhausgase werden insgesamt eingespart (Knappe et al. 2015).

Kriterium 4: Preisverzerrungen?

Steuerentlastungen (von der Energie- und Stromsteuer)¹ für die Produktion mineralischer Düngemittel bewirken eine verstärkte Nachfrage nach mineralischen anstelle organischer Dünger (UBA 2016b).

Ebenso relevant für die Analyse möglicher Preisverzerrungen ist, dass Umweltfolgekosten durch freigesetzte CO₂-Emissionen beim Abbau von Torf nicht eingepreist werden. Würden pro Tonne emittiertem Kohlendioxid 195 € Umweltfolgekosten [680 € mit Zeitpräferenz] (Matthey / Bünger 2020) in den Preis für torfhaltige Blumenerde einbezogen, würde dieser etwa 189 €/Tonne [660 €/Tonne] Torf höher liegen² und damit etwa 83 % [knapp 4 Mal] höher als der tatsächliche Verkaufspreis.³

¹ Richtlinie 2003/96/EG des Rates vom 27. Oktober 2003 zur Restrukturierung der gemeinschaftlichen Rahmenvorschriften zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom, Art. 2, Abs. 4, lit. b)

² Emissionen: 0,97 kg CO₂ / kg Torf (Boldrin et al. 2010)

³ Verkaufspreis Floratorf = 229 €/t bzw. 0,08 €/l / 0,35 kg/l Quelle: https://www.hornbach.de/shop/Floratorf-Floragard-225-L/5136469/artikel.html?wt_cc2=38684471934&wt_cc3=178241074302&gclid=Cj0KCQiA2af-BRDzARIsAIVQUOckz-sAL90QEuihMpPfaZASdXeunDASaSASh5qliiegRN6B9JvWzHxgaAkSU-EALw_wcB&wt_cc6=5136469&wt_mc=de.paid.sea.google.alwayson.assortment.gar.pla.751377569.38684471934.&wt_cc1=751377569 und <https://www.mollet.de/info/schuettgut-dichte.html>

Kriterium 5: Verlagerungen ins Ausland?

Ein Verbot des Torfabbaus in Deutschland trägt die Gefahr, dass Torf oder torfhaltige Erden verstärkt importiert wird. Bereits heute ist Deutschland der zweitgrößte Importeur von Torf (Hirschler / Osterburg 2019). In der Schweiz sind beispielsweise alle Moore seit 1987 geschützt, der Torfbedarf wird seitdem durch Importe gedeckt. Seit wenigen Jahren versucht die Schweiz über freiwillige Selbstverpflichtungen sowie Forschung und Entwicklung von geeigneten Ersatzprodukten, den Torfeinsatz zu mindern (Carlen / Tschümperlin 2019).

Gegenwärtig werden unterschiedliche Torfersatzstoffe untersucht und ausprobiert. Neben Holzfasern gelten insbesondere Kokosprodukte (Fasern, Mark und Chips) aufgrund ihrer strukturgebenden Eigenschaften als geeigneter Ersatz. Die Kokosprodukte sind Abfallstoffe aus der Kokosproduktion vor allem in Indien und Sri Lanka, etwa 100 Tsd. m³ werden jährlich in Deutschland für die Substratherstellung verwendet. Die Kokosabfälle müssen gewaschen, gepuffert, getrocknet und gepresst werden, um die Salzgehalte zu senken und die Stabilität der Fasern zu erhöhen. Torfersatzprodukte aus der Kokosproduktion sind mit 40 – 80 kg CO₂-Äq / m³ verbunden, d.h. Komposten vergleichbar (ohne Berücksichtigung möglicher zusätzlicher Vorteile durch eine Kaskadennutzung) (Stucki 2019; Wegener 2019). Bei Kokosfasern liegt jedoch ein knapp 5 Mal höheres Eutrophierungspotenzial für Süßwasser vor als vergleichsweise bei Torf (2 g P_{Äq} / m³). Komposte haben mit 1,7 g P_{Äq} / m³ ein geringeres Eutrophierungspotenzial. Gleichermaßen schneiden Kokosfasern bei der Flächennutzung mit etwa 110 m²a/m³ schlechter ab als Torf (ca. 30 m²a/m³) und Kompost (ca. 10 m²a/m³) (Stucki 2019).

Kriterium 6: Nachweise möglich?

Nachweise über gütegesicherte Substratkomposte (RAL, Substratkomposte in zwei Typ-Klassen) sind etabliert.

4.3.5.3 Abschließendes Fazit

Eine Substitutionsquote, die einen Mindesteinsatz von geeigneten Komposten in der Erdenproduktion (anstelle von Torf) vorsieht, könnte die Nachfrage nach hochwertigen, veredelten Komposten erhöhen und damit die Erreichung der Ziele des KrWG unterstützen. Vorteilhaft ist, dass Standards und Zertifizierungssysteme für geeignete Komposte bereits existieren. Eine Substitutionsquote ist insbesondere für Erden und Substrate denkbar, die im Hobbygartenbau zum Einsatz kommen und im Allgemeinen keine vergleichbar anspruchsvollen Anforderungen erfüllen müssen wie dies im Erwerbsgartenbau der Fall ist. Eine Substitutionsquote könnte zudem die Nachfrage nach anderen, ggf. problematischen Torfersatzstoffen mindern.

Aber auch eine Internalisierung der Umweltkosten der Torfnutzung oder ein Verbot der Nutzung von Torf in Pflanz- und Blumenerden könnten die Reduktion der Torfnutzung bewirken. Ein Vergleich geeigneter Instrumente ist nicht Gegenstand dieser Studie; es sei jedoch darauf verwiesen, dass bei diesen beiden Ansätzen Importverbote bzw. Importbepreisungen umgesetzt werden müssten, und eine hochwertige Nutzung von biotischen Abfällen nicht zwingend gegeben ist.

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 10: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Erden / Komposte

	Eignung SQ	Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+	Fertigkomposte mit geringer Nährstoffdichte haben das Potenzial, in torf reduzierten oder torffreien Pflanz- und Blumenerde insbesondere im Hobbygartenbau eingesetzt zu werden.
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	+	Das jährliche Aufkommen an Bio- und Grüngut in Deutschland bietet eine ausreichende Grundlage für eine Verwertung der Bioabfälle zu Komposten. Potenziale aus der Nachrotte von Vergärungsanlagen sind noch nicht vollständig erschlossen. Weitere Potenziale liegen in den noch recht großen Mengenflüssen an biotischen Abfällen, die beispielsweise über den Restmüll entsorgt und keiner stofflichen Verwertung zugeführt werden.
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	+ / o	Prinzipiell ist eine Kaskadennutzung bei der Verwertung von Bioabfällen anzustreben. Das bedeutet, dass Bioabfälle zunächst für die Biogaserzeugung genutzt und anschließend einer stofflichen Verwertung der Gärreste (möglichst zu Fertigkompost) sichergestellt werden sollte. Damit wird das wertgebende Potenzial der Bioabfälle am besten genutzt.
Kriterium 4) Preisverzerrungen?	+	Steuererleichterungen begünstigen mineralische Dünger. Ebenso werden die Umweltkosten des Torfabbaus gegenwärtig nicht eingepreist.
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	+	Aktuell werden unter anderem Kokosfasern, Reststoffe der Kokosproduktion, importiert. Kokosfasern schneiden im ökobilanziellen Vergleich teilweise schlechter ab als Komposte.
Kriterium 6) Nachweispflicht möglich?	+	ja, über die RAL Gütezeichen

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.6 Altkleider/Textilien

4.3.6.1 Einführung und Problematik

Das Altkleideraufkommen lag 2018 bei 1.271 Tsd. Tonnen. 62 % (788 Tsd. t) des Sammelaufkommens wurde einer Wiederverwendung zugeführt, die Secondhandware wird fast vollständig ins Ausland exportiert. 14 % (178 Tsd. t) wurden einer stofflichen Verwertung (zu Dämmmaterialien) zugeführt, 12 % (152 Tsd. t) einer Weiterverwendung (als Putzlappen). 8 % (102 Tsd. t) wurden thermisch verwertet und 4 % (51 Tsd. t) der Beseitigung zugeführt. (bvse 2020)

26 % der Altkleider werden recycelt, die etablierten Verwertungsoptionen umfassen jedoch Downcycling-Aktivitäten der Altkleider, und stehen etwa nicht erneut einem Recyclingverfahren zur Verfügung. Positiv ist, dass durch die Recyclingaktivitäten (fossile und biotische) Primärmaterialien ersetzt werden. Die Rückgewinnung der reinen Faser, für eine direkte Rückführung in die Textilproduktion, ist technisch bedingt u.a. durch die abnehmende Qualität und Fasergemische der Altkleider und einem logistischen Sortieraufwand nicht möglich.

Der Konsum von Textilien und Bekleidung (sowie Leder und Lederwaren) verursachte im Jahr 2015 etwa 4 % der gesamten CO₂-Emissionen der deutschen Güterverwendung (nach Anschaffungspreiskonzept). Absolut wurden durch die inländische Produktion und eingeführte Waren dieser Gütergruppe 16,56 Mio. t CO₂ emittiert. Der Anteil von 4-5 % an den gesamten deutschen CO₂-Emissionen ist seit 2008 konstant geblieben (Destatis 2019b). Der durch die letzte inländische Verwendung von Textilien und Bekleidung (und Lederwaren) anfallende Rohstoffrucksack in 2016 beträgt 16 Mio. t RME. Damit sind 1,3 % des Rohmaterialkonsums Deutschlands auf die Gütergruppe Textilien, Bekleidung und Lederwaren zurückzuführen (Destatis 2020d).

Die Gütergruppe ist aus deutscher Sicht moderat rohstoff- und klimarelevant. Dennoch ist die Textil- und Bekleidungsbranche aus einer globalen Perspektive von ökologischer Bedeutung. Umweltbelastungen der Textilbranche und des deutschen Konsums von Textilien werden typischerweise ins Ausland verlagert. Ökologische Belastungen entstehen dabei entlang der gesamten Wertschöpfungskette, etwa beim Anbau von Baumwolle durch den Einsatz von Pestiziden, oder durch toxische und aufbereitete Abwasserflüsse durch die Textilproduktion (Färben). Textilien werden zunehmend auf Basis von synthetisch hergestellten Fasern (auf Rohölbasis) produziert. Etwa 75 % der Bekleidungstextilien in Deutschland bestehen aus synthetischen chemischen Fasern, für Heimtextilien (z.B. Teppiche, Decken, Sofabezüge, Matratzen, etc.) liegt der Anteil sogar bei 85 %. Der Einsatz von technischen Textilien (z.B. Einlagevliesstoffe, Wind- und Wetterschutzliner, Sicherheitsgurte, Planen, etc.) geht fast vollständig auf Synthetik-Fasern zurück (Industrievereinigung Chemiefaser e.V. 2019).

Nutzungsdauern von Textilien und Bekleidung werden durch das Phänomen der **Fast-Fashion** (seit 2000) und abnehmender Produktqualitäten mehr und mehr verkürzt, wodurch die Menge an Altkleidern und Textilabfällen konstant steigt. Allein zwischen 2000 und 2014 hat sich die globale Bekleidungsproduktion verdoppelt und auf eine neu produzierte Kleidungsstückemenge von mehr als 100 Mrd. Stück (in 2014) erhöht (Greenpeace 2017). Das Textilaufkommen pro Kopf, bestehend aus Bekleidungs-, Heim- und Haustextilien, beläuft sich laut bvse (2020) auf 21,5 kg/a in 2018. Jeder Deutsche kauft sich im Schnitt 60 Kleidungsstücke pro Jahr und trägt diese nur noch halb so lange wie noch vor 15 Jahren. Dieser Trend führt auch in Deutschland zu einem stetig steigenden Altkleideraufkommen, welches unterschiedlichen Verwertungswegen zugeführt wird. In Deutschland wurden im Jahr 2018 im Vergleich zu 2015 ca. 8 % mehr Alttextilien den inländischen Sortieranlagen über das Getrenntsammlersystem zugeführt (bvse 2020).

Vor diesem Hintergrund soll geprüft werden, ob eine Substitutionsquote für Altkleider/Alttextilien generell geeignet ist, um eine verstärkte Kreislaufführung in der textilen Verarbeitungskette zu ermöglichen.

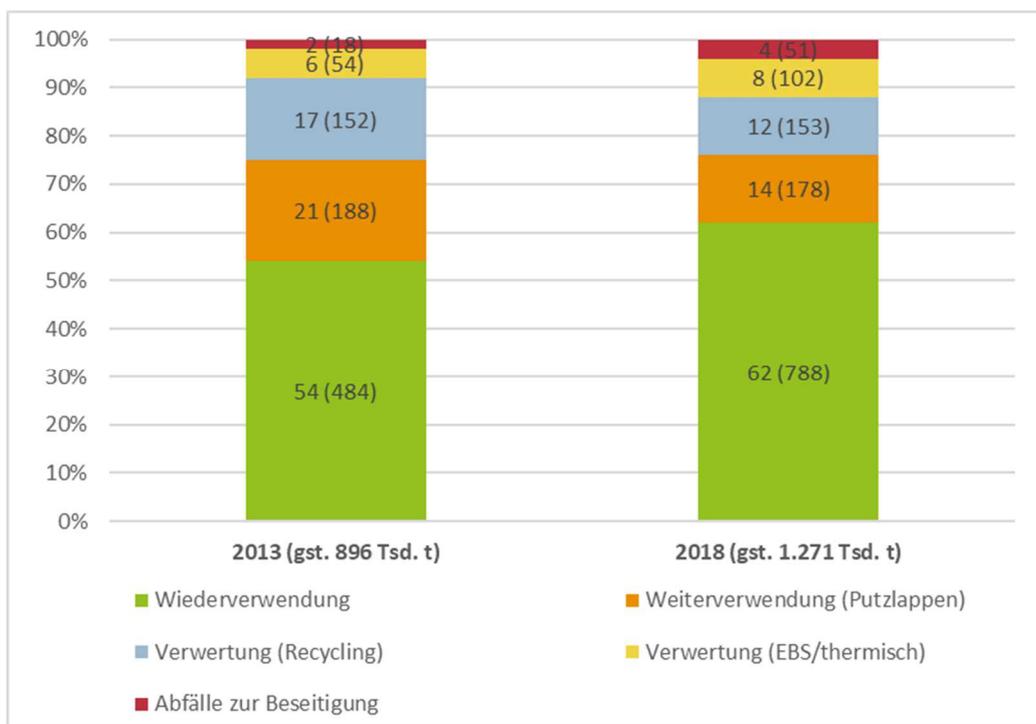
Es ist vorab festzuhalten, dass weder eine Substitutionsquote noch eine Recyclingquote geeignet sind, um der Herausforderung des steigenden Aufkommens an (Bekleidungs-)Textilien und den entsprechenden Abfällen (bzw. Altkleidern) entgegenzuwirken. Um dem Trend der Fast Fashion zu begegnen, müssen andere Lösungswege erarbeitet werden.

4.3.6.2 Analyse der Kriterien zur Eignung einer Substitutionsquote

Kriterium 1: Einsatzmöglichkeiten für Altkleider vorhanden?

Einsatzmöglichkeiten für Altkleider/Textilien sind in Deutschland bereits vorhanden. Ein Blick auf die derzeit etablierten stofflichen Verwertungswege und Mengen zeigt den Umfang des derzeitigen Markts (vgl. Abbildung 26). Insgesamt wurden im Jahr 2018 [2013] etwa 330 Tsd. t [340 Tsd. t] Altkleider einer stofflichen Verwertung zugeführt (Putzlappen und Recycling); das entspricht 26 % [38 %] der gesammelten Altkleidermenge von 1.271 Tsd. t [896 Tsd. t]¹. In 2018 liegt der Anteil der wiederverwendeten Altkleider höher als vergleichsweise 2013. Gleichermäßen steigen aber auch die Anteile der thermisch verwerteten und beseitigten Altkleider an (von 8 auf 12 %) (bvse 2020 /Steger et al 2017).

Abbildung 26: Verwertungswege von Alttextilien in % (und Tsd. t) für das Jahr 2013 und 2018 im Vergleich



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von BVSE (2020)

Die stoffliche Verwertung von Altkleidern umfasst im Wesentlichen zwei zentrale Stränge:

- (1) die Aufbereitung zu Putzlappen: Als alternative stoffliche Verwertungsmöglichkeit wurden 2018 etwa 14 % (ca. 178 kt) der nicht mehr tragfähigen Textilien zu Putzlappen geschnitten und verarbeitet. Die Putzlappenrohstoffe werden zunächst in Handarbeit oder mit Hilfe von Maschinen von Knöpfen, Schnallen oder Reißverschlüssen befreit, anschließend zugeschnitten und umsäumt (bvse 2020).

¹¹ Das Sammelaufkommen wird für 2018 gemäß bvse nach einer „Grundmethode“ berechnet. Die absoluten Angaben zum Altkleideraufkommen für das Jahr 2013 hingegen basieren auf Berechnungen von Steger et al. (2019). In der Studie werden im Vergleich zu den absoluten Angaben für 2018 (basierend auf bvse Fachverband Textilrecycling 2020) die Massenanteile von Schuhen herausgerechnet, welche bei etwa 20 Ma% liegen.

- (2) eine Faserrückgewinnung in der Reißspinnstoffindustrie: Etwa 12 % (ca. 152 Tsd. t) der gesammelten Altkleider werden als Reißware verwertet und als Recyclingfasern genutzt. Reißbetriebe bereiten die Textilien zu Faserprodukten auf, aus denen dann beispielsweise Garne gesponnen oder Vliese gebildet werden. Diese werden als technische Textilien bzw. Faserprodukte vor allem als Dämmmaterialien (Wärme-/Schalldämmmaterialien in der Baubranche), Füllmaterialien, Malervlies oder Innenverkleidung in der Automobil oder Baubranche eingesetzt und substituieren auf diese Weise Primärmaterialien (Steger et al. 2019).

Vor allem in der Baubranche besteht ein großes Einsparpotenzial von Primärmaterialien wie Mineralwolle-Dämmstoffen, die auf Basis fossiler Rohstoffe unter hohem Energieaufwand produziert werden. Jährlich werden gemäß Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (FV-WDVS) etwa 35 bis 40 Mio. m² Wärme- und Dämmmaterialien in Neubauten und Sanierungen verbaut (Schöpfel et al. 2018). Mit nur etwa 5 - 10 % sind Dämmstoffe aus nachwachsenden bzw. recycelten Rohstoffen ein Nischenprodukt und umfassen derzeit hauptsächlich Holzfaser und Holzwolle. (Grimm 2017) Ein Potenzial für den Einsatz von Alttextilien als Dämmstoffe wird in keiner uns bekannten Studie quantifiziert, es gibt jedoch Unternehmen, die sich auf das Recycling von Altkleidern zu Dämmmaterialien spezialisieren (siehe Kriterium 3).

Nach Angaben des bvse-Fachverbands Textilrecycling werden Synthetikfasern agglomeriert und regranuliert und kommen in der Spritz-Kunststoffherstellung zum Einsatz oder werden zu textilen Hartfaserplatten verarbeitet (bvse n.d.). Es liegen zum aktuellen Stand keine differenzierten Daten zur Verwendung von recycelten Textilfasern nach Anwendungsfeldern vor.

Die Verwertungsstrukturen zeigen, dass zwar Einsatzmöglichkeiten für Altkleider/Textilien und deren stoffliche Nutzung bestehen, die tatsächliche Wiedergewinnung der reinen Textilfaser durch Wiederauftrennen der Stoffe ist in der Praxis jedoch selten anzutreffen (Umweltruf.de 2018). Die derzeitige Verwertungspraxis ist durch ein Downcycling geprägt.

Die Rückgewinnung sortenreiner Recyclingfasern ist aufgrund der enthaltenen Fasergemische außerordentlich herausfordernd. Der Trend zu Fasergemischen steigt zudem vermehrt an. Vor diesem Hintergrund werden derzeit große Hoffnungen in das chemische Recycling, also die Zerlegung von Alttextilien und Kunststoffen in ihre Ausgangsstoffe oder Reaktion zu anderen wichtigen Basischemikalien gesetzt. Die Möglichkeiten des chemischen Recyclings für Alttextilien wurden im Rahmen des RESYNTEX-Projekts (von der EU im Rahmen von Horizon 2020 gefördert) im Pilotmaßstab getestet (Friege 2020). Allerdings liegen sowohl die Kosten als teilweise auch die THG-Bilanz noch deutlich über den bisherigen konventionellen stofflichen Verwertungsoptionen (siehe Kriterium 1). Es ist daher aktuell nicht zu erwarten, dass kurzfristig eine Aufbereitung von Alttextilien in sortenreine Fasern, die erneut in die textile Produktion eingespeist werden können, vorliegen wird, die zudem eine ökologisch vorteilhaftere Variante darstellt.

Neben den Stoffströmen der gesammelten Alttextilien fallen bereits während der textilen Wertschöpfungskette Textilabfälle oder Ausschussware (z.B. Verschnitte, Garne, Fasern) in verschiedenen Produktions- und Verarbeitungsprozessen an. Diese liegen z.T. noch sortenrein vor und können dann erneut über ein Garn- oder Faserrecycling in die Produktion zurückgeführt werden (Friege 2020). Schmidt et al. (2017) nennen in ihrer Studie *100 Betriebe Ressourceneffizienz* Praxisbeispiele aus produzierenden Unternehmen. Im Bereich Textilrecycling kann etwa die Otto GmbH hervorgehoben werden, einem Produzenten von Garnen

und Zwirnen aus Baumwolle. Das Unternehmen hat im Rahmen des *Recot Projekts* anfallende textile Abfälle aus Baumwolle in der Wertschöpfungskette aufbereitet und daraus ein Recyclinggarn („Recot Garn“) hergestellt. Die recycelten Baumwollfasern wurden aus aufbereiteten Produktionsabfällen verschiedener Prozessstufen gewonnen, z. B. aus den in der Spinnerei entstehenden Fadenresten und den Verschnittkanten der Strickerei oder Weberei. Das Unternehmensbeispiel zeigt, dass es technisch möglich ist, recycelte Baumwollgarne herzustellen, die mit Qualitätsstandards konventioneller Garne vergleichbar sind (Schmidt et al. 2017).

Der Blick auf die inländisch produzierten Bekleidungs- und Heimtextilien (ca. 83 Tsd. t in 2018) im Vergleich zum Außenhandelsaldo (ca. 1.430 Tsd. t in 2018) zeigt deutlich, dass die Produktion der Kleidung im Ausland stattfindet und nur limitierte Steuerungsmöglichkeiten einer Kreislaufführung von Produktionsabfällen bestehen (bvse 2020). Es ist daher von zentraler Bedeutung, die inländischen Möglichkeiten einer hochwertigen Altkleiderverwertung auszuschöpfen.

Kriterium 2: Ausreichende Mengen vorhanden?

Im Folgenden wird geprüft, ob für die Implementierung einer Substitutionsquote ausreichende Mengen recycelter Altkleider zur Verfügung stehen oder unter gegebenem technischen Entwicklungsstand absehbar zur Verfügung stehen können.

Wie Steger et al. (2019), Fehrenbach et al. (2017), sowie bvse Fachverband Textilrecycling (2020) und Korolkow (2015) aufzeigen, besteht bereits ein etablierter Recyclingmarkt für Alttextilien. Wie oben beschrieben wurden aus den inländischen Sortieranlagen 26 % bzw. 330 Tsd. Tonnen der Altkleider einer stofflichen Verwertung zugeführt. Darüber hinaus wurden 62 % der gesammelten Altkleider einer Wiederverwendung (ReUse) zugeführt. Diese Menge von etwa 788 Tsd. t gemischter Textilien steht einer stofflichen Verwertung, im Sinne der Abfallhierarchie, nicht zur Verfügung (Steger et al 2017 / bvse 2020). Ein Potenzial aus dieser Menge wäre möglicherweise gegeben, wenn die Wiederverwendung in Deutschland erfolgen würde. Durch den überwiegenden Export (bvse 2020; Korolkow 2015) stehen diese Mengen nach Erreichen des Lebensendes nicht für den nationalen Recyclingmarkt zur Verfügung. Der Anteil der thermisch verwerteten und beseitigten Altkleider ist 2018 im Vergleich zu 2013 um 4 % gestiegen und beläuft sich auf 152 Tsd. t. Im Sinne der Abfallhierarchie ist eine stoffliche Verwertung der thermischen vorzuziehen. Herausfordernd ist allerdings die stark abnehmende Qualität der gesammelten Altkleider. Laut bvse (2020) liegt der Schad- und Störstoffanteil vor der Sortierung bei ca. 10,8 %; dieser Anteil wird dem tatsächlichen Sammelaufkommen zugerechnet. Sortierunternehmen müssen diese nichttextilen Abfälle kostenpflichtig beseitigen, da eine stoffliche Verwertung an dieser Stelle nicht möglich ist. Weiterhin ist der Anstieg der thermischen Verwertung darauf zurückzuführen, dass der steigende Anteil von Altkleidern aus erdölbasierten Chemiefasern einen höheren Brennwert hat und daher dieser Verwertungsweg ökonomischer erscheint (bvse 2020).

Zusätzliche Mengenpotenziale liegen in den Alttextilien, die keiner Sammlung zugeführt wurden. Die Mengen an Altkleidern, die über den Restmüll entsorgt werden, aber stattdessen potenziell stofflich verwertet werden könnten, beliefen sich 2018 auf 363 Tsd. t. Damit wurden 22 % des Altkleideraufkommens keiner getrennten Sammlung zugeführt (bvse 2020).¹ Die Werte stimmen gut mit der Analyse des Hausmülls und den textilen Anteilen im

¹ Laut Steger et al (2017) wurden 2013 ca. 19 % der Altkleider keinem Getrenntsammlungssystem zugeführt. Die Differenz zwischen bvse (2020) und Steger et al (2017) kommt dadurch zustande, dass in der bvse-

Restmüll überein; pro Einwohner fallen etwa 4,5 kg Alttextilien an (ca. 370 Tsd. t Alttextilien) (Dornbusch et al. 2020).¹ Erneut ist anzumerken, dass der Trend zur abnehmenden Qualität eine stoffliche Verwertung schwieriger und weniger lukrativ macht, sodass das Potenzial einer stofflichen Verwertung (der momentan noch über den Restmüll entsorgten Altkleidern) stark begrenzt ist. (bvse 2020)

Wie bereits am Beispiel der Otto GmbH aufgezeigt wurde (siehe Kriterium 1), können Produktionsausschüsse, die sortenrein vorliegen und während verschiedener Prozesse entlang der Wertschöpfungskette anfallen, erneut einem Produktionszyklus zugeführt werden. Dies ist für Unternehmen an sich erstrebenswert, da die Entsorgung von Ausschussmaterial im Sinne der Materialflusskostenrechnung zu höheren Kosten führt und daher vermieden werden sollte. Eine Einschätzung der Größenordnung der Produktionsabfälle bietet die Abfallstatistik von Destatis. Die Erhebung der Abfallerzeugung der Leder, Pelz- und Textilindustrie im Jahr 2014 ergibt, dass 58,6 Tsd. t Abfälle verarbeitete Textilfasern und 11,2 Tsd. t Abfälle unbehandelte Textilfasern sind. Es ist nicht bekannt, wie diese Abfälle verwertet/entsorgt werden. Insbesondere unbehandelte und sortenreine Textilabfälle könnten demnach für eine Faseraufbereitung in Betracht kommen. Die Mengenströme liegen jedoch nur bei ca. 11,2 Tsd. t unbehandelter Textilfasern², sie sind somit überschaubar (Destatis 2020e).

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendungen?

Im Sinne der Abfallhierarchie, ist diese Wiederverwendung vor einer stofflichen Verwertung im rechtlichen Sinne anzustreben, um das wertgebende Potenzial zu erhalten. Wie oben bereits aufgezeigt, liegt der Anteil der Secondhand Kleidung 2018 bereits bei 62 % (788 Tsd. t) (bvse 2020).

Auch aus ökobilanzieller Betrachtung ist ReUse vorteilhaft gegenüber anderen Verwertungswegen, insbesondere, weil durch ReUse die Nutzungsdauer verlängert wird (Fehrenbach et al 2017). Fehrenbach et al. (2017) gehen davon aus, dass durch die Verlängerung der Nutzungsdauer zumindest teilweise die Substitution eines neuen T-Shirts erreicht wird.³

Die Wiederverwendung des Großteils des Altkleideraufkommens ist im Sinne der Abfallhierarchie sinnvoll.

Die stoffliche Verwertung von Alttextilien, die nicht einer Wiederverwendung zugeführt werden können, ist trotz des dominierenden Downcyclings als positiv zu bewerten, da eine Substitutionswirkung von Primärmaterial durch die produzierten Putzlappen, Vliese und Dämmstoffe eintritt. Steger et al. (2019) differenzieren in ihrer Studie, welche Substitutionsäquivalente durch die Verwertung in der Reißspinnstoffindustrie und der Alttextilverarbeitung geschehen. Demnach werden durch die verwerteten Alttextilien in der Reißspinnindustrie etwa 71 % Synthefasern auf Erdölbasis substituiert (Abbildung 27).

Studie zusätzlich zum Altkleideraufkommen auch das Aufkommen und die Entsorgung von Schuhen einbezogen wurde. Nicht mehr gebrauchte Schuhe werden eher über den Restmüll entsorgt anstatt sie einer Kleidersammlung zuzuführen (Steger et al 2017).

¹ 4,5 kg/[E*a] * 82 Mio. E = 370 Tsd. t

² Die Größenordnung der Ausschussware (11,2 Tsd. t unbehandelte Textilfaser) passt mit den von BVSE (2020) abgeschätzten Produktionsmengen überein. Laut Hemkhaus et al. (2019) fallen in der Textilproduktion etwa 12 % Verschnitt und Ausschuss an.

³ Es wird ein Äquivalenzfaktor von 0,6 für die Substitution angesetzt. Durch Re-Use werden demnach 0,6 T-Shirts substituiert.

Abbildung 27: Stoffliche Verwertung der in Deutschland erfassten Alttextilien 2013 (ohne Im- und Exporte)

Verwertungsort	Abfall	Verwertete Menge	Produkt	Substitutionsäquivalent
Reißspinnstoffindustrie	Alttextilien	151 Tsd. t	Verkleidung und Füllungen im Automobilbau, Dämmmaterialien (Wärme, Schall)	Synthesefasern auf Erdölbasis (71 %) Cellulosefasern (27 %) Baumwolle (2 %)
Alttextilverarbeitung	Alttextilien	187 Tsd. t	Putzlappen und weitere Produkte aus Alttextilien	Cellulose (60 %) Polyester (40 %)

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Steger et al. (2019)

Die Verwendung von Alttextilien als Dämmmaterial ist auch außerhalb der Automobilindustrie möglich. Das slowakische Recycling-Unternehmen SK-TEX hat sich auf die Verwertung von Alttextilien spezialisiert und produziert Dämmmaterialien für die Innen- und Außenisolierung im Gebäudebau, sowie zur Schalldämmung. Als Inputmaterial bezieht das Unternehmen durch Kooperationen mit Einzelhandelsunternehmen, wie Lidl oder Kaufland, gebrauchte Arbeitskleidung aus Baumwolle und verarbeitet ebenso synthetische Fasern z.B. aus alten Sitzbezügen und Innenverkleidungen von Fahrzeugen. Laut Hersteller reicht eine Tonne Alttextilien aus, um ausreichend Dämmmaterial für ein durchschnittliches Haus (ca. 40 m³) zu produzieren. Die Dämmmaterialien, die als EKOSSEN HMC u.a. in Frankreich, Polen, Tschechien und auch Deutschland vertrieben werden, sind lt. Hersteller schimmelresistent und flammhemmend und insbesondere durch eine wirksame Feuchtkontrolle auch für Allergiker und Asthmatiker geeignet. Die durch SK-TEX produzierten Dämmmaterialien ersetzen konventionelle Produkte wie Mineral und Glaswolle die auf Basis fossiler Rohstoffe und energieintensiven Verfahren hergestellt werden. Laut Hersteller lassen sich die Materialien beim Rückbau von Gebäuden erneut recyceln (EC 2021; SK-TEX 2019).

Kriterium 4: Preisverzerrungen?

Der allgemeine Trend, dass vermehrt synthetische Fasern verwendet werden, kann auch auf den niedrigen Rohölpreis zurückgeführt werden (bvse 2020). Hinzu kommt, dass es Steuerbefreiungen für die nicht-energetische Verwendung fossiler Rohstoffe gibt, was die Produktion von (primären) Chemiefasern begünstigt (UBA 2016b).

Vor diesem Hintergrund besteht kein Anreiz zur Rückgewinnung von (synthetischen) Textilrezyklaten, um mit diesen Primärrohstoffen zu substituieren.

Kriterium 5: Verlagerung der Umweltwirkungen ins Ausland?

Das Kriterium, ob durch aktuelle Verwertungswege Umweltwirkungen ins Ausland verfrachtet werden, die durch eine Substitutionsquote gemindert werden könnten, ist für Alttextilien relevant: Bereits während der Textilherstellung im Ausland entstehen diverse negative Umweltwirkungen, um Kleidung u.a. für den deutschen Konsum zu produzieren. Bereits beim Anbau, etwa von konventioneller Baumwolle, werden große Mengen an Pestiziden und Düngern eingesetzt, während der Textilverarbeitung werden zudem über 70 gesundheits- und umweltgefährdende Chemikalien verwendet und Gewässer durch mangelnde Abwasserreinigung verschmutzt (Greenpeace 2017).

Über die Hälfte der gesammelten Alttextilien (788 Tsd. t in 2018) werden als Secondhandware erneut genutzt. Zentral ist, dass diese fast vollständig ins Ausland exportiert wird, wie die Außenhandelsstatistik (WA63090000) zeigt (Steger et al. 2019). Exportierte Altkleider (Secondhand-Kleidung) fallen nicht unter das Abfallrecht, da sie kein Abfall im Sinne §3 KrWG sind. Es muss damit nicht nachgewiesen werden, dass diese nach Ende der Nutzungsdauer ordnungsgemäß sowie rohstoff- und umweltschonend verwertet werden. Auch Recyclingunternehmen, die Altkleider innerhalb der Europäischen Union exportieren, müssen nicht nachweisen, dass die Abfälle nach dem Verkauf auch ordnungsgemäß und schadlos verwertet werden (recyclingnews 2018). Es besteht somit keine Transparenz, wie diese Textilien am Ende ihrer Nutzungsphase entsorgt werden.

Kriterium 6: Nachweise möglich?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

4.3.6.3 Abschließendes Fazit

Auf Grundlage der untersuchten Kriterien lässt sich abschließend aussagen, dass eine Substitutionsquote im engeren Sinne für Altkleider und -textilien nicht geeignet ist, eine Kreislaufführung im Textilbereich zu fördern. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie und bei den derzeit begrenzten technischen Möglichkeiten zur sortenreinen Faserrückgewinnung eine Wiederverwendung, wie sie derzeit dominiert, wünschenswert. Etablierte stoffliche Verwertungswege (wie in die Reißspinnstoffindustrie und die Alttextilverarbeitung) zeichnen sich durch ein Downcycling aus, haben jedoch eine substituierende Wirkung und sollten daher beibehalten werden, insbesondere solange keine anderen höherwertigen stofflichen und ökobilanziell vorteilhaften Verwertungsmöglichkeiten verfügbar sind.

Ein Ansatzpunkt für eine Substitutionsquote als lenkendes Instrument kann in der Herstellung von Dämmstoffmaterialien für die Automobilindustrie, (zukünftig) auch darüber hinaus für den Innen- und Außenanbau von Gebäuden liegen. Die Europäische Kommission verweist beim Thema Öko-Innovationen auf das slowakische Recycling-Unternehmen SK-Tex, welches Dämmmaterialien aus Altkleidern bereits nach Deutschland vertreibt. Kennzeichnend ist, dass das Unternehmen gezielt Kooperationen mit Handelsunternehmen schließt, um Altkleider mit entsprechender Qualität zu beziehen, die dann zu ressourcen- und energieschonenden Wärme- und Schalldämmungen verarbeitet werden (EC 2021; SK-Tex 2019). Ein verpflichtender Einsatz von Altkleidern aus Baumwolle oder technischen Textilien, wie bei SK-Tex praktiziert, für die Herstellung von Dämmstoffen könnte die Substitution von konventionellen, auf fossilen Rohstoffen basierten Produkten befördern. Dieser Ansatz bedarf jedoch einer weitergehenden Untersuchung, etwa hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten nach deutschen Baustoffanforderungen, und wie sich eine solche Quote auf bisherige Altkleiderströme zur Wiederverwendung oder Alttextilverarbeitung auswirkt (Bsp. Putzlapfen).

Sortenreine Produktionsausschüsse (z.B. Baumwollgarn) in der inländischen Textil- oder Garnproduktion können technisch aufbereitet und einem erneuten Produktionsprozess zugeführt werden. Aufgrund der geringen Mengenrelevanz der Textilverarbeitung in Deutschland ist eine Substitutionsquote an dieser Stelle jedoch kein geeignetes Instrument. Schulungen und Kommunikationskampagnen zu Materialkosteneinsparungen durch Vermeidung von Materialausschuss bzw. effizienter Rückführung von Material in den Verarbeitungsprozess erscheinen in diesem Kontext als geeigneteres Instrument zur Ressourcenschonung (z.B. 100 Betriebe für Ressourceneffizienz).

Eine Substitutionsquote für Alttextilien ist grundsätzlich kein geeignetes Instrument, um die zentralen Herausforderungen des steigenden Aufkommens an Bekleidungstextilien durch den Fast Fashion Trend bei kontinuierlich abnehmenden Qualitäten und einem daraus resultierenden Mengenproblem entgegenzuwirken. An dieser Stelle müssen andere Lösungswege (Konsumentenbewusstsein, Verantwortlichkeiten in Bezug auf Abfall- und Müllproblematiken) erarbeitet werden.

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 11: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Altkleider / Textilien

	Eignung SQ	Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	o / -	Aufgrund technischer Limitierungen können Textilfasern derzeit nicht mit hinreichender Qualität wiedergewonnen werden. Möglichkeiten, Primärrohstoffe für die textile Wertschöpfungskette zu substituieren sind daher begrenzt. Hinzu kommt, dass die Produktion von Garnen und Textilien hauptsächlich außerhalb Deutschlands stattfindet. Altkleider finden jedoch Einsatz als Dämmstoffe, Innenverkleidungen oder Putzlappen außerhalb der Textilbranche.
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	+	<p>Aufgrund bereits langjährig etablierter Sammelsysteme stehen grundsätzlich bereits große Mengen stofflich verwertbarer Altkleider zur Verfügung, die anteilig bereits stofflich verwertet werden. Die größeren Mengenanteile entgehen dem deutschen Markt zwar durch den überwiegenden Export zur Wiederverwendung, die derzeit stofflich verwerteten Mengen (Reißfasern, Putzlappen) übersteigen jedoch die begrenzte nationale Produktion um den Faktor 4. Der Anteil der über den Restmüll entsorgten Altkleider stellt ein zusätzliches Mengenpotenzial dar.</p> <p>Insgesamt nimmt jedoch die Qualität der Textilfasern ab, was eine Aufbereitung erschwert. Dies hat in den letzten Jahren zu einem Anstieg der thermischen Verwertung von Altkleidern und -textilien geführt.</p>
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	o / -	<p>Aufgrund der beschriebenen limitierten Möglichkeiten einer hochwertigen und sortenreinen Faserrückgewinnung, sowie einer teils noch ungünstigen Ökobilanz des chemischen Recyclings, das zudem nur teilweise RC-Fasern bereitstellen kann, ist zumindest mittelfristig kein sinnvollerer Wiedereinsatz von Altkleidern zur Textilherstellung in Sicht.</p> <p>Vor dem Hintergrund des gegebenen Technik- und Wissensstands kann derzeit nicht eingeschätzt werden, ob eine sortenreine Rückgewinnung von RC-Fasern zum Wiedereinsatz in der Textilherstellung eine ökologisch sinnvollere Verwendung darstellen würde als die derzeitige stoffliche Verwertung. Die Wiederverwendung von Alttextilien ist im Sinne der Abfallhierarchie grundsätzlich vorrangig (ReUse vor stofflicher Verwertung), allerdings ist die Abweichung von der Rangfolge ausdrücklich eingeschlossen, wenn die bessere Eignung nachgewiesen wird (§ 6 (2) KrWG). Da eine entsprechende Lebenszyklusanalyse in Ermangelung geeigneter technischer Recyclingverfahren derzeit nicht möglich ist, kann das Kriterium „sinnvollere Verwendung“ bezüglich einer Substitutionsquote gegenwärtig nicht hinreichend geprüft werden.</p> <p>Im Sinne der Abfallhierarchie (so die stoffliche Verwertung nicht als gleichwertig oder vorrangig nachgewiesen werden kann) liegt ein limitiertes Potenzial darin, dass wiederverwendete Kleidung im Sinne einer Kaskadennutzung am Ende der Lebensdauer zunächst stofflich verwertet wird, bevor sie einer thermischen Verwertung zugeführt wird. Aufgrund der abnehmenden Qualität über die verlängerte Nutzungsphase sind die Möglichkeiten einer hochwertigen stofflichen Verwertung jedoch erneut begrenzt (Fehrenbach et al. 2017).</p>

Eignung SQ		Erläuterung
		Allerdings liegen keine Untersuchungen vor, in welchem Umfang die Qualität von Alttextilien durch ReUse reduziert wird/werden könnte.
Kriterium 4) Preisverzer- rungen?	+	Textilien werden bereits mehrheitlich und dem historischen Trend folgend auch weiterhin verstärkt auf Basis synthetischer Fasern produziert; begünstigt wird dies durch den niedrigen Rohölpreis. Es besteht kein Anreiz zur Rückgewinnung von (synthetischen) Textilrezyklaten, um mit diesen Primärrohstoffe zu substituieren.
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	+	<p>Der Auslagerung der Umweltbelastungen durch die Entsorgung der Secondhandkleidung im Ausland am Ende der Lebensdauer kann auf nationaler Ebene weder durch eine Substitutionsquote noch durch eine Recyclingquote effektiv entgegengewirkt werden. Die Wiederverwendung von Altkleidern im rechtlichen Sinne ist grundsätzlich einer stofflichen Verwertung vorzuziehen. Eine Umlenkung der Sekonhandware durch eine entsprechend ausgearbeitete Quote müsste die Abweichung von der Rangfolge der Abfallhierarchie durch Nachweis des Gleichrangs oder Vorrangs berücksichtigen (s.o.). In der Praxis ist ein solcher Nachweis schwierig, da eine Substitutionsquote sich auf ein spezielles Verfahren richtet (RC-Fasern), das KrWG aber auf Recycling im Allgemeinen abhebt.</p> <p>Prinzipiell ist vor diesem Hintergrund anzustreben, dass nach Ende der Nutzungsphase im Ausland eine weitere Kaskade sichergestellt wird. Die Alttextilien sollten demnach einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Vor dem Hintergrund abnehmender Qualitäten (aufgrund des gestiegenen Altkleideraufkommens, sowie aufgrund der verlängerten Nutzungsdauer) ist hier jedoch eine Limitierung der Möglichkeiten zu erwarten.</p>
Kriterium 6) Nachweis- pflicht mög- lich?	k. A.	Nicht analysiert

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.7 Altholz

4.3.7.1 Einführung und Problematik

Das Altholzaufkommen in Deutschland beläuft sich jährlich auf etwa 10 Mio. t, vorrangig stammt das Altholz aus Bau und Abbrucharbeiten (ca. 4 Mio. t.), aus der Holzverarbeitung (2,5 Mio. t) oder fällt über den Sperrmüll an (ca. 1 Mio. t). Der Markt für Altholz ist von einem Überangebot geprägt. Das Überangebot resultiert aus einem anhaltenden Bauboom, hohen Importmengen, Schadholzmengen durch klimatische und wetterbedingte Ursachen wie Überschwemmungen und Sturmereignissen oder durch Käferbefall, sowie ungeplante Anlagenstillstände (Fehrenbach et al 2017; Flamme et al. 2020). Aus dem Überangebot von Altholz resultieren Entsorgungsengepässe sowie eine negative Preisentwicklung.

Derzeit dominiert die thermische Verwertung des Altholzes; 79 % (ca. 7,9 Mio. t) werden verbrannt, 15 % (1,5 Mio. t) werden stofflich verwertet und in der Holzwerkstoffindustrie

zur Herstellung von Spanplatten genutzt. Andere Recyclingwege sind nicht etabliert. Insgesamt wurden 2016 ca. 5,4 Mio. t Spanplatten produziert, der Altholzanteil liegt bei 27 %. Ca. 6 % des Altholzaufkommens wird beseitigt (Flamme et al. 2020).

Altholz wird in Abhängigkeit der Belastung des Holzes vier verschiedenen Schadstoffkategorien zugeordnet (bvse n.d.). Für die Altholzkategorien I und II besteht die Möglichkeit, das Altholz über eine Kaskadennutzung mehrfach stofflich zu nutzen. Der bvse Fachverband Ersatzbrennstoff, Altholz und Biogene Abfälle berichtet, dass sowohl für die energetische Verwertung als auch für die stoffliche Verwertung von Altholz Absatzschwierigkeiten bestehen (bvse n.d.).

Vor dem Hintergrund des bestehenden Überangebots und der derzeitigen, deutlich dominierenden thermischen Verwertungspraxis wird im Folgenden geprüft, inwieweit eine Substitutionsquote für Altholz geeignet ist, um eine intensivere stoffliche Nutzung zu ermöglichen.

4.3.7.2 Analyse der Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

Der in Deutschland etablierte stoffliche Verwertungsweg ist die Nutzung von Altholz in der Holzwerkstoffindustrie. Dort werden Altholzanteile zur Herstellung von Spanplatten genutzt. 2016 flossen etwa 1,5 Mio. t Altholz in die Produktion von Spanplatten und substituieren auf diese Weise Frischholz. Insgesamt wurden 2016 ca. 5,4 Mio. t Spanplatten produziert, was einem Altholzanteil von etwa 27 % entspricht (Flamme et al. 2020).

Da nahezu keine technischen Einschränkungen zum Anteil von Altholz in Spanplatten vorliegen (Flamme et al. 2020; Knauf 2017), besteht ein deutliches Potenzial, die Substitution von Frischholz in Spanplatten weiter zu steigern. In Dänemark belaufen sich die Anteile von Altholz in Spanplatten unter Verwendung deutscher Schadstoffklassen beispielsweise auf 61 %. Der Einsatzbereich von Altholz in Spanplatten zeigt daher gute Potenziale auf (Flamme et al. 2020). Die potenziellen Mengen werden unterschiedlich quantifiziert:

- Unter Berücksichtigung der verfügbaren Altholzmenge mit hinreichender Qualität schätzt der Verband Holzwerkstoffindustrie e.V. einen möglichen Einsatz von ca. 2 Mio. t, was einem Anteil von 40 % Altholz in Spanplatten entsprechen würde (Flamme et al. 2020).
- Flamme et al. (2020) berechnen unter Berücksichtigung von Transportentfernungen, dass bis zu 3,24 Mio. t Altholz in Spanplatten stofflich verwertet werden könnten, einem Anteil von 60 %.
- In einer Studie von Fehrenbach et al. (2017) werden für Altholz unterschiedliche Szenarien analysiert. Unter der theoretisch maximalen Annahme, dass bis zu 100 % Altholznutzung in Span- und Faserplatten sowie Möbeln (je nach Produkt) realisierbar sind, quantifizieren Fehrenbach et al. (2017), dass bis zu 4,2 Mio. t Altholz stofflich verwertet werden können. Damit ist es im Vergleich zum derzeitigen Einsatz (ca. 1,2 Mio. t) in einem ambitionierten Szenario möglich, 2,9 Mio. t zusätzliches Altholz stofflich zu verwerten (Fehrenbach et al. 2017).

Eine Substitution von Frischholz durch Altholz zur Herstellung von Spanplatten ist auch vor dem Hintergrund sinnvoll, dass Spanplatten in den Einsatzbereichen Innenausbau und Möbelbau jeweils weitere Primärrohstoffe ersetzen können (Fehrenbach et al. 2017):

- Im Innenausbau können Spanplatten Gipskartonplatten ersetzen.
- Ebenso ist im Innenausbau die Substitution von Leichtbetonelementen denkbar.
- Im Möbelbau können etwa Regalböden andere Materialien wie Stahlblech ersetzen.

Ein zukünftig mögliches Anwendungsfeld von Altholz ist der Einsatz in der Chemikalienproduktion. Aus ökobilanzieller Betrachtung zeigt die Umlenkung von Altholz in die Chemikalienproduktion für die Umweltwirkungskategorie Klimawandel (GWP100; Klimawirkungspotenzial über einen Zeitraum von 100 Jahren) jedoch nur einen geringen Vorteil gegenüber der aktuellen Verwertungspraxis (Fehrenbach et al. 2017).

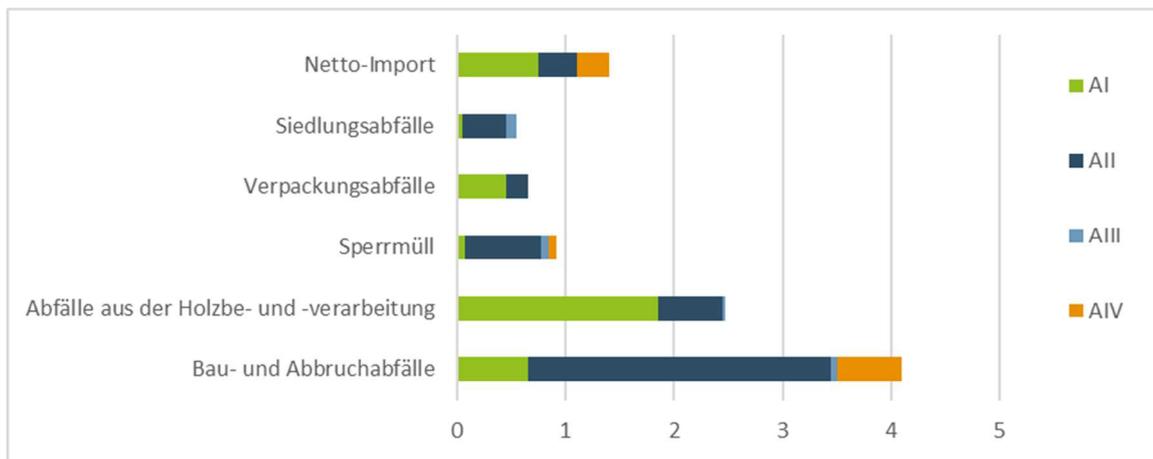
Bestehende Hemmnisse zum Einsatz von Altholz in Spanplatten sind die Sammlung und die Qualität des Altholzes. Im Rahmen der Sammlung von Altholz im Bau oder Abbruchbereich kommt es zu einer Vermischung von Hölzern unterschiedlicher Güteklassen. Qualitativ hochwertiges (unbehandeltes und naturbelassenes Holz) wird durch die Art der Sammlung mit behandelten oder schadstoffbelastetem Altholz (z.B. Blei, Arsen oder Cadmium) vermischt. Bei gewerblichen oder privaten Sammelsystemen (Recyclinghöfen) erfolgt eine Einschätzung der Altholzqualitätsmerkmale häufig visuell. Zur Vermeidung von Fehleinschätzung werden Althölzer häufig (fälschlicherweise) einer schlechteren Altholzkategorie zugeordnet. Eine Einstufung in die Altholzkategorien III und IV bedeutet, dass diese Altholz mengen nicht mehr für eine stoffliche Verwertung in Frage kommen (Fehrenbach et al. 2017).

Kriterium 2: Ausreichende Altholz-Mengen verfügbar?

Die mengenmäßig bedeutendsten Altholzanteile stammen aus Bau und Abbrucharbeiten (ca. 4 Mio. t.), etwa 2,5 Mio. t Altholz fallen bei der Holzverarbeitung an, knapp 1 Mio. t fallen über den Sperrmüll an (siehe Abbildung 28). Insgesamt beläuft sich das Altholzaufkommen jährlich auf ca. 10 Mio. t.

Flamme et al. (2020) zeigen in Abbildung 28 das Potenzial der Altholzzusammensetzung nach Güte kategorien. Gemäß der Studie sind 38 % (3,8 Mio. t) des anfallenden Altholzes demnach der besten Altholzkategorie I zuzuordnen, etwa 50 % werden der Altholzkategorie II zugeordnet. Damit steht ein Altholzaufkommen von etwa 9 Mio. t zur Verfügung, welches eine ausreichende Qualität hat, um einer stofflichen Verwertung zugeführt zu werden. Scholl (2014) zeigt jedoch, dass der Pentachlorphenol (PCP)-Gehalt innerhalb der Altholzkategorie II teilweise überschritten wird, sodass eine stoffliche Verwertung für einen solchen Fall nicht möglich ist. Das Potenzial für eine stoffliche Nutzung von Altholz liegt unter Berücksichtigung dieser Schadstoffgrenze demnach etwas geringer. Verglichen mit dem aktuellen Niveau von gerade einmal 1,5 Mio. t, die in der Holzwerkstoffindustrie stofflich verwertet werden, besteht ein deutliches Potenzial nach oben.

Abbildung 28: Altholzaufkommen nach Herkunftsbereich und Altholzkategorie in 2016 (in Mio. t/Jahr)



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von Flamme et al. (2020)

Für die Lenkung der Altholzströme hin zu einer vermehrt stofflichen Verwertung ist die regionale Verfügbarkeit von Altholzaufbereitungsanlagen und Spanplattenwerken zu beachten. Bei einer angenommenen maximal möglichen Transportentfernung von 250 km liegen etwa 21 % der Aufbereitungsanlagen außerhalb des Einzugsgebietes von verfügbaren Spanplattenwerken (Flamme et al. 2020).

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendungen?

Im Rahmen dieses Kriteriums wird untersucht, ob durch eine Substitutionsquote Altholzstoffströme zu einer aus ökobilanzieller Perspektive sinnvolleren Verwendung umgelenkt werden könnten. Wie oben aufgeführt, werden 79 % des Altholzes thermisch verwertet. Im Sinne einer Kaskadennutzung ist, wie bei der Nutzung biotischer Abfälle, auch bei Altholz das wertgebende Potenzial eines Rohstoffs möglichst zu erhalten.

Fehrenbach et al. (2017) zeigen in ihrer Studie, dass die Erhöhung der Altholzmenge in der Spanplattenherstellung im Vergleich zu einem Basisszenario aus ökobilanzieller Betrachtung vorteilhaft ist. Wenn die gesamte verfügbare Altholzmenge der Altholzkategorie I der stofflichen Verwertung zugeführt würde, würde sich der Altholzanteil von 18,5 % (Basisszenario) auf 50 % erhöhen. Zudem wird von einer Erhöhung der Spanplattenproduktion von 4,3 Mio. t/Jahr auf 6,8 Mio. t/Jahr ausgegangen¹. Das Basisszenario zeigt für die Umweltwirkungskategorie Klimawandel (GWP100) eine jährliche Emission von ca. 13,1 Mio. t CO₂-Äq/Jahr, gegenüber 10,9 Mio. t CO₂-Äq/Jahr bei einer Erhöhung des Altholzanteils in Spanplatten. Die Erhöhung des Altholzanteils in der Spanplattenproduktion führt folglich zu einer jährlichen Reduzierung der THG-Emissionen um 17 %. (Fehrenbach et al 2017)

Kriterium 4: Preisverzerrungen vorhanden?

Politisch gesteuerte Preisverzerrungen, etwa durch Subventionen, sind uns nicht bekannt. Die Preisentwicklungen sind maßgeblich vom Überangebot beeinflusst und zeigen in den

¹ In der Studie wurde hierbei angenommen, dass 40 % Gipskartonplatten (für den Innenausbau), 40 % Stahlbleche (für Möbelteile) und 20 % Leichtbetonelemente (für den Innenausbau) substituiert werden (Fehrenbach et al. 2017).

Altholzkategorien I – IV seit dem Jahr 2009 bis 2019 einen abnehmenden Trend. Die Ursachen für die preislichen Schwankungen sind divers, besonders relevant ist das verfügbare Altholzaufkommen, welches bedingt durch klimatische Ereignisse, Lagerbestände, Bauaktivitäten, Schadholzmengen und Anlagenauslastungen variiert. Im Juni 2019 (aktuellster Wert in Flamme et al. (2020)) erhielten Altholz-Aufbereiter lediglich für unbehandeltes Altholz (\cong A I) einen Erlös von < 20 €/t (0-150 mm Dicke). Für alle weiteren Altholzqualitäten mussten Zuzahlungen geleistet werden (EUWID 2019; Flamme et al. 2020).

Die derzeitigen Altholzpreise führen dazu, dass eine thermische Verwertung lukrativer ist als eine stoffliche Verwertung. Eine Substitutionsquote kann bei entsprechender Ausgestaltung dazu beitragen, dass ein gesicherter Absatzmarkt für Altholz (bzw. Hackschnitzel aus Altholz) besteht. Eine erhöhte Nachfrage kann zudem einen positiven Effekt auf den Altholzpreis haben.

Kriterium 5: Auslagerung Umweltbelastung ins Ausland?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

Kriterium 6: Nachweise möglich?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

4.3.7.3 Abschließendes Fazit

Auf Grundlage der untersuchten Kriterien (siehe Kapitel 4.3.7.2) lässt sich abschließend empfehlen, dass eine Substitutionsquote für Altholz geeignet ist, um den Einsatz von Altholz zu fördern und Primärholz zu schonen. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie und auch aus ökobilanzieller Betrachtung eine stoffliche Verwertung von Altholz wünschenswert und der thermischen Verwertung vorzuziehen. Die stoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie hat ökologische Vorteile und eine substituierende Wirkung (von Frischholz, ebenso wie indirekt von Produkten in gleichen Anwendungsbereichen wie Gipskartonplatten, Stahlblech und Leichtbetonelemente) und sollte daher weiter ausgebaut werden.

Angesichts der großen Potenziale, den Altholzanteil in der Spanplattenproduktion zu steigern, kann eine Substitutionsquote direkt dort ansetzen. Unter Berücksichtigung möglicher Schadstoffbelastungen und derzeit noch bestehender Herausforderungen bei der Altholzsammlung und Zuordnung zu Altholzkategorien, ist es empfehlenswert, die Substitutionsquote zumindest kurzfristig noch moderater anzusetzen. Mittelfristig könnten Quoten vergleichbar Dänemark angestrebt werden (ca. 60 %).

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 12: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Altholz

	Eignung SQ	Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+	Altholz kann insbesondere für die Herstellung von Spanplatten verwendet werden. Da der Anteil von Altholz noch deutlich gesteigert werden kann, erscheint eine Substitutionsquote prinzipiell sinnvoll.
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	+	Vor dem Hintergrund potenziell verfügbarer Altholzmengen der Kategorien I und II stehen bereits ausreichende Mengen zur Verfügung, um eine Substitutionsquote für Altholz zu implementieren, sofern Transportentfernungen von aufbereitetem Altholz zu entsprechenden Spanplattenwerken nicht unverhältnismäßig sind.
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	+	Eine Erhöhung des Altholzanteils in Spanplatten bzw. eine Erhöhung der stofflichen Nutzung von Altholz ist aus ökobilanzieller Sicht vorteilhaft.
Kriterium 4) Preisverzerrungen?	o / -	Derzeit besteht ein Überangebot von Altholz, aber keine Preisverzerrung. Eine Substitutionsquote kann bei entsprechender Ausgestaltung dazu beitragen, dass ein gesicherter Absatzmarkt für Altholz (bzw. Hackschnitzel aus Altholz) entsteht.
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	k. A.	Nicht analysiert
Kriterium 6) Nachweispflicht möglich?	k. A.	Nicht analysiert

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.8 Papier/Altpapier

4.3.8.1 Einführung und Problematik

2019 wurden in Deutschland 22,1 Mio. t Papier produziert. Die Zellstoff- und Papierindustrie generierte dabei einen Umsatz von 14.342 Mio. €. Sowohl die Produktion als auch der Umsatz der Zellstoff- und Papierindustrie sank im Vergleich zum Vorjahr um 2,7 % bzw. 6,6 %. (VDP 2020) Papiere, Kartonagen und Pappe werden in vier Hauptbereiche unterteilt (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Papiertypen und deren Produktion in 2019, sowie Veränderung zum Vorjahr

	Produktion 2019 [in Mio. t]	%-Veränderung ggü. 2018
Papier, Karton Pappe für Verpackungszwecke	12,1	+ 0,7
Grafische Papiere	7,1	-8,3
Hygienepapiere	1,5	-0,6
Papiere und Pappe für spezielle technische Verwendungszwecke	1,4	-2,8

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von VDP (2020)

Von der gesamten Produktion in 2019 entfielen 54,8 % auf Verpackungspapiere, 32,2 % auf grafische Papiere, 6,2 % auf Spezialpapiere sowie 6,8 % auf Hygiene-Papiere (VDP 2020). Es ist zu beobachten, dass mit Ausnahme der Verpackungspapiere alle anderen Bereiche rückläufige Produktionsmengen aufweisen (Tabelle 13). Dieser Trend ist u.a. mit einer geringeren Nachfrage aufgrund der Digitalisierung zu begründen. Packpapiere hingegen nehmen u.a. aufgrund des wachsenden Onlinehandels tendenziell zu (Purr et al. 2019).

Im Jahr 2019 wurden 17,2 Mio. t Altpapier verbraucht. Die Altpapierersatzquote, welche das Verhältnis des Altpapierverbrauchs zur (inländischen) Papiererzeugung ausdrückt, liegt 2019 bei 77,7 % und damit etwa 2,3 % höher als im Vorjahr und knapp 15 % höher als 2000 (UBA 2020e; VDP 2020).

Innerhalb der vier Papierbereiche variieren die Altpapierersatzquoten deutlich zwischen 45 und >100 %. Für Pappe, Karton und Pappe sind bereits geschlossene Rohstoffkreisläufe etabliert; hier wurde 2019 eine Altpapierersatzquote von 101 % erreicht. Ein Wert über Hundert ist (statistisch) deswegen möglich, da während der Altpapieraufbereitung bis zu 20 % Papierfasern verloren gehen, was durch eine einen höheren Altpapierersatz in der Produktion ausgeglichen wird. Die Altpapierersatzquote bei grafischen Papieren liegt bei 53 %, bei Spezial-Papieren bei 44 % und bei Hygienepapieren bei 51 %.(VDP 2020). Insbesondere bei den Hygienepapieren ist ein hoher Altpapierersatz von Bedeutung, da derzeit kein Recyclingkreislauf oder separate Sammlung für diese Papiere (z.B. Handtücher) etabliert sind.

Die genutzten Altpapiermengen stammen hauptsächlich aus der inländischen Rückgewinnung von Altpapier; die Altpapierrücklaufquote liegt bei 78 % (VDP 2020).

Die Zellstoff- und Papierindustrie zählt zu den fünf energieintensivsten Sektoren Deutschlands und verursachte 2018 etwa 10 % des Gesamtverbrauchs der Industrie (Purr et al. 2019). Für die Herstellung einer Tonne Primärfaserpapier wird etwa so viel Energie benötigt wie zur Produktion einer Tonne Stahl (FÖP 2012). Zwischen 1990 und 2000 ist es durch die Steigerung des Altpapierersatzes gelungen den Energieeinsatz pro erzeugter Tonne Papier zu senken. Seit 2011 ist jedoch erneut ein Anstieg des mittleren Energieeinsatzes pro Tonne Papier zu verzeichnen, was auf Maßnahmen zur Qualitätssteigerung (aufwändigere Sortierung, höhere Weißgrade, glattere Oberfläche) zurückzuführen ist. 2018 lag der mittlere Energieeinsatz bei 2,6 MWh/t erzeugtem Papier. (UBA 2020g)

Vor diesem Hintergrund wird untersucht, ob eine Substitutionsquote für Altpapier ein geeignetes Instrument ist, um den Einsatz und die Kreislaufführung von Altpapier noch weiter zu erhöhen, und dadurch Primärmaterialien zu schonen.

4.3.8.2 Analyse der Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

Die Möglichkeit für ein Recycling von Altpapier zu Papierfasern besteht etwa 6- bis 7-mal. Mit jedem Recyclingzyklus wird die Qualität der Papierfasern vermindert, daher muss zur Aufrechterhaltung des Papierkreislaufs ein Zufluss von Primärfasern in Höhe von etwa 20 % erfolgen, je nach Papiertyp variiert der Anteil der Primärfasern (VDP n.d.). Der Recyclinganteil von Altpapier in der Papierindustrie ist daher technisch limitiert (Purr et al. 2019). Die derzeitige Altpapiereinsatzquote liegt bei 77,7 % (2019). Tabelle 14 zeigt die Entwicklung der Altpapiereinsatzquoten seit 2010 bis 2019.

Tabelle 14: Altpapiereinsatzquote in % (2010 bis 2019)

	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke	101	100	100	99	100	101
Wellpappenpapiere	109	108	108	106	108	109
Faltschachtelkarton	92	89	89	88	85	86
Sonst. Verpackungspapiere und -pappen	73	71	68	70	69	70
Grafische Papiere	47	52	53	52	51	53
Zeitungspapiere	111	118	117	117	113	114
Sonst. grafische Papiere / inkl. Naturzeitschriften	29	32	34	34	35	36
Hygienepapiere	53	48	46	45	50	51
Papiere und Pappen für technische und spezielle Verwendungszwecke	42	43	43	44	44	44
Papier, Pappe, Karton insgesamt						
Altpapiereinsatzquote	70	74	74	75	76	78
Altpapierrücklaufquote	77	75	74	74	75	78

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von VDP (2020)

Für Zeitungsdruck- und Wellpappenrohstoffe werden statistisch betrachtet mehr als 100 % Altpapier eingesetzt. Dies ist auf die Aufbereitung des Altpapiers zurückzuführen; bei dieser werden Sortierreste und Verunreinigungen abgeschieden, wodurch auch Papierfasern

verloren gehen. In der Produktion werden daher bis zu 20 % mehr Rohstoff eingesetzt (UBA 2020e).

Bei grafischen Papieren (z.B. für Zeitschriften, Büro- und Administrationspapiere) liegt die Altpapier Einsatzquote 2019 bei etwa 53 % (bzw. 36 %) (VDP 2020). Insbesondere bei Büro-papieren besteht ein Potenzial den Altpapier Einsatz deutlich zu steigern (FÖP 2012)

Auch bei Hygienepapieren (z.B. Toilettenpapier, Papiertaschentüchern oder Küchenrollen) ist die Altpapier Einsatzquote mit 51 % niedrig (VDP 2020). 2010 lag der Einsatz von Altpapier bei Hygiene-Papieren etwas höher (bei 53 %). Laut FÖP (2012) lag die Quote um die Jahrtausendwende bei ca. 75 %. Für Hygienepapieren kann der Einsatz von Altpapier daher erneut deutlich erhöht werden. Bei Spezialpapieren (z.B. Thermopapiere oder Kaffeefilter) liegt der Recyclinganteil bei ca. 44 %.

Eine Analyse des maximalen Altpapier Einsatzes der jeweiligen Kategorien, sowie den jeweiligen Faserverlusten bei der Aufbereitung der verschiedenen Altpapierarten konnte aufgrund mangelnder Informationen zum Zeitpunkt der Studie nicht durchgeführt werden. In einem laufenden Projekt untersuchen Kauertz et al. (unveröffentlicht) Umweltwirkungen von Hygiene- und Spezialpapier.

Ein weiterer bereits etablierter Einsatzbereich von Altpapier ist die Verwertung zu Dämmstoffen für den Innenausbau. Für diesen Recyclingweg, welcher jedoch ein Nischenmarkt ist, werden hauptsächlich Zeitungspapiere verwendet. Die sogenannte Zellulosedämmung wird aus zerkleinertem Altpapier unter Zugabe von Borsalzen oder/und anderen Zusatzmitteln hergestellt und ist wiederverwertbar. Dämmstoffe aus Zellulose (z.B. Zelluloseeinblasdämmung, Dämmschüttung, oder Zellulosedämmplatten) können als Wärme- und Schalldämmung eingesetzt werden. Es gibt eine Reihe von Unternehmen die Zellulosedämmungen in Deutschland produzieren. (Kaiser et al. 2019) Zellulosedämmstoffe haben unter den auf dem Markt verfügbaren Ökodämmstoffen einen Marktanteil von ca. 32 % (Schneider 2020), insgesamt ist der Marktanteil für Dämmstoffe aus nachwachsenden oder recycelten Rohstoffen mit nur etwa 5 - 10 % jedoch gering. (Grimm 2017) Eine Ausweitung dieses Marktsegments würde eine Substitution von Dämmstoffen auf Basis primärer und fossiler Rohstoffe befördern.

Kriterium 2: Ausreichende Mengen verfügbar?

2019 wurden in Deutschland 18,9 Mio. t Papier, Karton und Pappe verbraucht. Rund 14,7 Mio. Tonnen Altpapier werden davon inländisch über Entsorgungsunternehmen und den Altpapierhandel wieder erfasst (Altpapieraufkommen), was einer Rücklaufquote von 78 % entspricht. (VDP 2020)

Nicht das gesamte Altpapieraufkommen steht für eine stoffliche Verwertung zur Verfügung. Ein Teil des Altpapiers wird etwa über gemischte Siedlungsabfälle gesammelt und ist teils stark verschmutzt und wird demnach bereits vor oder nach einer Sortierung oder Schredderanlagen nur einer thermischen Behandlung oder einer energetischen Verwertung zugeführt. 2015 flossen vom Altpapieraufkommen etwa 18 % in eine thermische Verwertung (ca. 3,3 Mio. t) (Steger et al. 2019) Eine Reduzierung von Fehlwürfen sowohl privat als auch gewerblich und eine noch konsequentere Getrennthaltung und Sammlung von Altpapier kann zu einer höheren stofflich verwertbaren Altpapiermenge beitragen. Eine Auswertung der deutschen Restmülltonne zeigt, dass etwa 5,2 Gew. % Altpapier sind. Das sind ca. 6,6 kg pro Person und Jahr und 0,55 Mio. t insgesamt. (Dornbusch et al. 2020)

Weiter Mengenpotenziale liegen derzeit noch bei der Sammlung höherwertiger Altpapiersorten, wie z.B. Büropapiere. Durch Erhöhung des Sammelaufkommens kann das Altpapieraufkommen erhöht werden. Etwa 20 % der produzierten Papiere können keinem Recycling zugeführt werden (VDP 2020).

Eine Hemmnis für ein noch höheres Altpapieraufkommen ist zudem, dass derzeit keine Sammelinfrastruktur für spezielle Hygienepapiere, wie Papierhandtücher, existiert. Zumindest für einen Teil der Hygienepapiere ließen sich separate Sammelinfrastrukturen etablieren, und eine Faserrückgewinnung ermöglichen. Die Produktion von Hygienepapieren lag 2019 bei etwa 1,5 Mio. t (VDP 2020).

Laut Angaben des VDP wird ein weiterer Teil der Altpapiere für technische Anwendungszwecke genutzt und ist damit nicht für eine stoffliche Verwertung einsetzbar. (VDP 2020, n.d.) Es wird in der Quelle nicht weiter erläutert, welche Anwendungen sich dahinter verbergen.

Deutschland exportierte 2019 etwa 2,5 Mio. t Altpapier. Diese Menge stünde bei einem Exportstopp demnach zusätzlich für den inländischen Markt zur Verfügung. Die Altpapierexporte sind 2019 im Vergleich zum Vorjahr um 11,4 % gesunken. Gleichzeitig importiert Deutschland bereits 4,9 Mio. t Altpapier aus dem Ausland und ist damit Nettoimporteur von Altpapier. (VDP 2020)

Aktuell werden die verfügbaren recyclingfähigen Altpapiermengen fast vollständig stofflich genutzt. Weitere Mengenpotenziale sind möglich, müssen jedoch zunächst etabliert werden.

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendungen?

Der Einsatz von Altpapier ist, wie oben aufgezeigt wurde, bereits hoch. Für die Analyse des dritten Kriteriums wird untersucht, wie der Einsatz von Altpapier bzw. stofflich verwertetem (recycelten) Papier aus ökobilanzieller Betrachtung gegenüber der Verwendung von Papier aus Primärfasern abschneidet und welche weiteren Verwendungsoptionen bestehen. Für die Eignung einer Substitutionsquote, die eben genau bei der Substitution von Primärmaterial ansetzt, ist dies eine zentrale Frage.

Der direkte Vergleich von einem Kilogramm Recyclingpapier und einem Kilogramm Primärfaserpapier zeigt, dass Recyclingpapier deutliche Vorteile hinsichtlich des Wasser und Energiebedarfs aufweist. Für die Herstellung eines Kilos Recyclingpapier werden 15 Liter (statt 50 Liter) und 2 kWh (statt 5 kWh) benötigt (UBA 2020g).

Fehrenbach et al. (2017) betrachten verschieden tiefe Kaskadennutzungen von Papier und bewerten diese ökobilanziell. Als Basisoption wird eine einstufige Kaskade modelliert, die nach der Nutzungsphase des Papiers eine direkte energetische Verwertung vorsieht. Die zweite Option beschreibt eine zweistufige Kaskade: Das aus der einstufigen Kaskade gesammelte Altpapier wird stofflich verwertet und als grafisches Papier erneut genutzt und anschließend energetisch verwertet. Die dritte Option beschreibt eine dreistufige Kaskade: Nach der Nutzung des Recyclingpapiers (als grafisches Papier, siehe Option 2) wird eine weitere Kaskade durch die Produktion einer Wellpappe modelliert. Auch hier erfolgt anschließend eine energetische Verwertung. Die Ergebnisse der verschiedenen Optionen zeigen deutlich den ökobilanziellen Vorteil der Kaskadennutzung von Papier auf. Dieser Vorteil erhöht je häufiger Altpapier in Kaskaden geführt wird. Die Ökobilanzergebnisse zeigen nicht

nur für die Umweltwirkungskategorie Klimawandel, sondern auch für weitere Wirkungskategorien wie Versauerung, Eutrophierung, Feinstaub, Naturrauminanspruchnahme, Ressourcenbeanspruchung (bio und fossil) deutliche Vorteile der mehrfachen Kaskadennutzung von Papier auf (Fehrenbach et al. 2017).

Ein weiterer denkbarer Einsatz ist die Verwendung von Altpapier für die Produktion von Dämmstoffen. Eine Studie von Knappe et al. (2007) zeigt jedoch, dass ein verstärkter Einsatz von Zellulosedämmstoffen (+10 %) in der Gebäudedämmung zu einer verstärkten Nutzung von Primärholz führt und in Folge eine ungünstige Treibhausgasbilanz bspw. im Vergleich zu Mineralwollämmstoffen hat (Knappe et al. 2007). Ein Vergleich des Einsatzes von Altpapier als Dämmmaterial versus thermischer Verwertung nach Ende des Papierkreislaufs liegt zum aktuellen Stand nicht vor.

Kriterium 4: Preisverzerrungen vorhanden

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

Kriterium 5: Verlagerung ins Ausland?

Zum derzeitigen Stand stehen keine überschüssigen Altpapiermengen inländisch zur Verfügung. Potenziale für weitere Altpapiermengen müssen erst ausgeschöpft werden (siehe Kriterium 2). Eine Substitutionsquote, z.B. von Altpapier zur Herstellung von Dämmmaterialien, würde je nach Ausgestaltung der Quote, demnach eine Umlenkung von Altpapierströmen, z.B. Zeitungspapier, bewirken und in diesem Segment eine Lücke hervorrufen. Knappe et al. (2007) zeigen, dass eine Kompensation durch eine erhöhte Waldholznutzung ökobilanziell ungünstig ist.

Alternativ können Altpapiermengen daher aus dem Ausland importiert werden. Europa ist mit 8 Mio. t jährlich Nettoexporteur von Altpapier (bvse n.d.). Zumindest kurzfristig könnten Altpapierbedarfe daher durch Importe gedeckt werden, bis inländische Potenziale für weitere Altpapiermengen weiter ausgeschöpft werden. Der Import von Altpapier sollte jedoch berücksichtigen, dass diese Altpapiermengen nicht der ausländischen Recyclingindustrie entzogen werden.

Kriterium 6: Nachweis möglich?

Der Einsatz von hochwertigem Altpapier kann und wird durch das Blaue Engel Siegel garantiert. Den Blauen Engel gibt es differenziert nach fünf Umweltzeichen für die verschiedenen Produktgruppen Recyclingpapier, Pressepapiere, Recyclingkarton, Hygienepapiere und Tapeten (FÖP 2012).

4.3.8.3 Abschließendes Fazit

Auf Grundlage der untersuchten Kriterien lässt sich abschließend aussagen, dass eine Substitutionsquote für Altpapier prinzipiell geeignet ist. Grundsätzlich hat sich in der Praxis in Deutschland bereits eine stoffliche Nutzung und Verwertung von Papier, Karton und Pappe auf einem sehr hohen Standard etabliert und ist ein Beispiel für eine erfolgreiche Kaskadennutzung. Für einzelne Papiersegmente, insbesondere für grafische Papiere und Hygienepapiere, besteht jedoch Steigerungspotenzial, das mit einer Substitutionsquote gehoben werden könnte. Insbesondere für Hygienepapiere ist anzustreben, eine Altpapiereinsatzquote von 75 % (oder höher) mittelfristig erneut zu erreichen, um Primärholz zu ersetzen, auch für

grafische Papiere (v.a. Druck- und Büropapiere) könnten ähnliche Größenordnungen angestrebt werden (FÖP 2012). Gleichmaßen müssen jedoch weitere Mengenpotenziale für verfügbares, gesammeltes Altpapier, wie etwa bei Büropapieren oder durch Etablierung separater Sammelinfrastrukturen für Hygienepapier (z.B. Handtücher), besser ausgenutzt werden. Die Erfüllung der Quote sollte mittelfristig möglichst aus der inländischen Altpapiersammlung und Aufbereitung erfolgen. Die Beschaffung von Altpapier aus dem Ausland zur Einhaltung der Quote sollte nur kurzfristig und nur dann erfolgen, wenn im Ausland keine stoffliche Verwertung stattfindet.

Weiterhin ist die Entwicklung der Papierbranche insgesamt, mit sich verschiebenden Marktsegmenten (rückläufiger Verbrauch im Segment grafische Papier (z.B. Zeitungen) und Zunahme bei Kartonagen) und deren Bedeutung für das Altpapieraufkommen, zu berücksichtigen.

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 15: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Papier/Altpapier

	Eignung SQ	Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+	Aktuelle Altpapiereinsatzquoten variieren je nach Papiersorte. Insbesondere für Hygienepapiere sowie grafische Papiere (UBA 2020e) bestehen technische Potenziale zum Einsatz von Altpapier, die durch eine Substitutionsquote besser ausgenutzt werden können.
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	0	Aufgrund hoher Altpapierrücklaufquoten sowie einem bestehenden internationalen Handel mit Altpapieren stehen ausreichende Altpapiermengen zur Verfügung. Die verfügbaren Altpapiermengen werden bereits fast vollständig einer stofflichen Verwertung zugeführt. Es existieren Potenziale für weitere Altpapiermengen, diese müssen aber zunächst etwa über neue separate Sammelsysteme für Hygienepapiere, ein höheres Sammelaufkommen von Büropapieren oder eine Reduzierung der privaten (und gewerblichen) Fehlwürfe erschlossen werden.
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	+	Die stoffliche Verwertung von Papier ist aus ökologischer Sicht der thermischen Verwertung vorzuziehen. Eine mehrstufige Kaskadennutzung erhöht den ökobilanziellen Vorteil des Papierrecyclings. Insgesamt kann empfohlen werden, noch weitere Rahmenbedingungen für mehrstufige Kaskadensysteme im Rahmen des technisch Möglichen zu schaffen. Eine Substitutionsquote kann an dieser Stelle bei entsprechender Ausgestaltung ein geeignetes Instrument sein. Eine stoffliche Verwertung von Altpapier zu Dämmstoffen ist aus ökobilanzieller Sichtweise nur dann sinnvoll, wenn ausreichend ungenutzte oder thermisch verwertete Altpapiermengen vorhanden sind, die nicht bereits recycelt werden.
Kriterium 4) Preisverzerrungen?	k. A.	Nicht analysiert

Eignung SQ		Erläuterung
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	+	Eine Substitutionsquote würde aufgrund begrenzter (verfügbarer) Altpapiermengen Importströme von Altpapier aus dem Ausland befördern. Europa ist derzeit Nettoexporteur von Altpapier. Altpapierbedarfe können demnach verstärkt aus dem Ausland beschafft werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Altpapiermengen nicht dem ausländischen Recyclingmarkt entzogen werden.
Kriterium 6) Nachweis- pflicht mög- lich?	+	Eine Nachweispflicht für Altpapier ist möglich und bereits durch das Blaue Engel Siegel etabliert. Diese Nachweispflicht kann entsprechend ausgeweitet werden. Die Nachweispflicht ist durch den Hersteller zu leisten.

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

4.3.9 Kunststoffabfälle

4.3.9.1 Einführung und Problematik

2019 wurden 14,2 Mio. t Kunststoffe in Deutschland für diverse Einsatzbereiche verarbeitet. Die mengenmäßig bedeutsamsten Anwendungsbereiche sind zu 31 % Verpackungen (4,4 Mio. t), zu 25 % der Baubereich (3,6 Mio. t), mit einem Zehntel Fahrzeuge (1,5 Mio. t), 6 % Elektronik (0,9 Mio. t; 6 %), sowie mit 4 % Haushaltswaren, Sport und Freizeitanwendungen (0,5 Mio. t) (siehe Tabelle 16).

Das Kunststoffabfallaufkommen beläuft sich 2019 auf 6,2 Mio. t. Die Ausschöpfungsrate der zur stofflichen Verwertung zugeführten Kunststoffabfälle (2,9 Mio. t) zu den 2,0 Mio. t produzierten Rezyklaten beträgt 87 %. Etwa 0,6 Mio. t Kunststoffe werden dem Export zugeführt. Die Rezyklateinsatzquote, also die Verwendung von Rezyklaten in die Kunststoffproduktion anstelle von Neuware, lag damit 2019 bei insgesamt 13,7 %. (conversio 2020)

Die Rezyklateinsatzquote variiert stark zwischen den verschiedenen Anwendungsbereichen; z.B. werden im Verpackungsbereich 10,9 % (0,47 Mio. t) Rezyklat eingesetzt (hauptsächlich PET), während in der Landwirtschaft bereits 36 % Rezyklate eingesetzt werden (z.B. für Agrarfolien), in Haushaltswaren, Elektronik und Möbeln liegt die Rezyklateinsatzquote je bei unter 5 %. Der Einsatz von Rezyklaten ist teils aufgrund strenger Qualitätsanforderungen (z.B. im Lebensmittelverpackungen oder der Medizin) nur limitiert möglich (conversio 2020). Insgesamt deuten die teils noch geringen Rezyklateinsatzquote darauf hin, dass noch deutliche Verbesserungen nötig sind, um geschlossenen Kreisläufen näher zu kommen.

Tabelle 16 zeigt die Menge der verarbeiteten Primär- und Sekundärkunststoffe in relevanten Bereichen für das Jahr 2019.

Tabelle 16: Menge der aller verarbeiteten Kunststoffe (primär und sekundär) nach Bereichen in 2019

Kunststoffverarbeitung (2019)	Insgesamt (Neuware und Rezyklat) [Mio. t]	Neuware [Mio. t]	Rezyklat [Mio. t]	Neuware [%]	Rezyklat [%]
Verpackung	4,369	3,895	0,474	89,1	10,9
Bau	3,583	2,749	0,834	76,7	23,2
Fahrzeuge	1,509	1,426	0,083	94,5	5,5
Elektro/Elektronik	0,881	0,850	0,031	96,5	3,5
Haushaltswaren, Sport/Freizeit	0,464	0,454	0,010	97,8	2,2
Möbel	0,456	0,435	0,021	95,4	4,6
Landwirtschaft	0,586	0,372	0,214	63,5	36,5
Medizin	0,271	0,271	0	99,9	0,1
Sonstiges	2,116	1,839	0,277	86,9	13,1
Gesamt	14,235	12,290	1,945	86,3	13,7

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von conversio (2020)

Vor diesem Hintergrund wird untersucht, ob eine Substitutionsquote für Kunststoffabfälle in der Kunststoffproduktion ein sinnvolles und geeignetes Instrument ist, um u.a. den Zielen der EU, bis 2025 10 Mio. t Rezyklate einzusetzen (welches auf Freiwilligkeit beruht), näher zu kommen (bvse Fachverband Kunststoffrecycling 2019) und den Primärrohstoffeinsatz zu reduzieren.

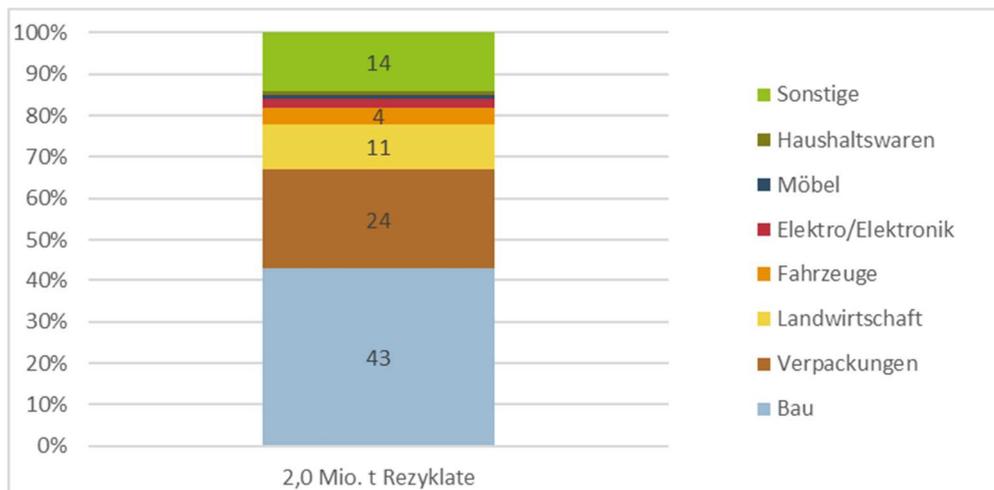
4.3.9.2 Analyse der Kriterien

Kriterium 1: Einsatzbereiche vorhanden?

2019 wurden 12,1 Mio. t Kunststoffprodukte in Deutschland verwendet, der größte Einzelposten hiervon sind Kunststoffverpackungen mit 26,5 %. Etwa 22,4 % nehmen Kunststoffprodukte im Bausektor ein (conversio 2020; UBA 2018b). Von den genutzten Kunststoffen wurden 2019 etwa 2,0 Mio. t Kunststoffrezyklate gewonnen und erneut genutzt. Interessant ist, dass die Kunststoffrezyklate nicht erneut mehrheitlich in das Segment der Verpackungen zurückfließen, sondern zu einem dominierenden Anteil von 43 % im Bau verwendet werden. Knapp 24 % der Kunststoffrezyklate fließen in den Verpackungsbereich, 2019 waren dies etwa 0,5 Mio. t. In Relation zu den produzierten Kunststoffverpackungen (ca. 4,4 Mio. t) ergibt sich für 2019 eine Rezyklateinsatzquote von 10,9 % (vgl. Tabelle 16).

Abbildung 29 zeigt die prozentuale Verteilung der Einsatzbereiche der Kunststoffrezyklate für 2019.

Abbildung 29: Verteilung der Einsatzbereiche für Kunststoffrezyklate in 2019 in Prozent



Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von conversio (2020)

Eine Studie der GVM (Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH) ermittelt basierend auf moderaten bis großen Einschränkungen der Mindestanforderung an Kunststoffrezyklate das derzeit maximal mögliche Potenzial für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten im Verpackungsbereich. Dieses wird auf etwa 0,9 Mio. – 2,2 Mio. t geschätzt, was einem Einsatzpotenzial von 22- 51 % anstatt derzeit. 11 % (in 2019) entspricht (BKV / GVM 2020).

Kriterium 2: Ausreichende Mengen verfügbar?

2019 wurden auf Basis des Aufkommens an Kunststoffabfällen (ca. 6,23 Mio. t) etwa 2,9 Mio. t einer stofflichen Verwertung zugeführt, davon gingen 0,6 Mio. t als Export-Überhang ins Ausland. Die Ausbeute (oder Ausschöpfungsrate) ergibt sich durch das Verhältnis der tatsächlich hergestellten Rezyklate (2,0 Mio. t) zum Input ins Recycling (2,3 Mio. t); die Ausbeute der stofflich verwerteten Kunststoffe zu Rezyklaten beläuft sich 2019 demnach auf 87 %. (conversio 2020). Es besteht also noch Potenzial, aus den verfügbaren Kunststoffabfällen eine größere Menge an Kunststoffrezyklaten zu gewinnen (conversio 2020; UBA 2018b).

Bislang ungenutzte Potenziale für das Kunststoffrecycling finden sich in der Restmülltonne im Bereich der privaten Haushalte (UBA 2016a). Im Jahr 2018 wurden etwa 0,77 Mio. t Kunststoffverpackungen über den Restmüllpfad (energetisch) entsorgt.¹ Demnach werden knapp ein Viertel der gesamten Kunststoffverpackungsabfälle in 2018 allein über den Entsorgungsweg einer möglichen stofflichen Verwertung entzogen (Detzel / Kauertz 2019).

In Steger et al (2019) werden für Polyethylen geringer und hoher Dichte (LDPE &HDPE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polyethylenterephthalat (PET) sowie Polystyrol (PS) sämtliche Stoffströme und Verwertungswege und -mengen analysiert. Die Einzelbetrachtung der Sankey-Diagramme zeigt auch hier, dass die deutliche Mehrheit der Post-Consumer Abfälle direkt einer energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung zugeführt wird. Einzige Ausnahme hier ist PET; von den 0,82 Mio. t Post-Consumer Abfällen in 2015

¹ Das gesamte Kunststoffverpackungsaufkommen lag 2017 bei 3,24 Mio. t. Die Menge der verwerteten Kunststoffverpackungen (außer Restmüll) betrug 2,46 Mio. t. Die Differenz ergibt die Menge der über den Restmüll entsorgten Kunststoffverpackungen (0,77 Mio. t) (Schüler 2020).

wurden 65 % einer stofflichen Verwertung zugeführt (Steger et al. 2019). Dieser Erfolg ist auf das Rücknahmesystem für Einweg-Pfandflaschen aus PET zurückzuführen (UBA 2019d).

Kriterium 3: Sinnvollere Verwendungen?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

Kriterium 4: Preisverzerrungen vorhanden?

Laut einer Umfrage des BDE (Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.) ist im ersten Halbjahr 2020 die Nachfrage nach Kunststoffrezyklaten stark zurückgegangen, je nach Kunststoff zwischen 15 – 90 %. Als zentrale Ursache für den Rückgang ist der Preisverfall für Primärkunststoffe auf Rohölbasis zu nennen, welcher sich pandemiebedingt noch weiter ausgeprägt hat. Kunststoffrezyklate sind im Vergleich zu Primärmaterial nicht wettbewerbsfähig, was die bislang etablierte Recyclinginfrastruktur vor Herausforderungen stellt (BDE e.V. 2020).

Ein finanzieller Anreiz zum Einsatz von Primärkunststoffe anstelle von Sekundärmaterialien liegt unabhängig von aktuellen Rohölpreisentwicklungen auch darin, dass Steuerbefreiungen für die nicht-energetische Verwendung fossiler Rohstoffe bestehen (UBA 2016b).

Prinzipiell besteht nach § 21 VerpackG die Möglichkeit, dass die Dualen System geringere Beiträge für Verpackungen aus Rezyklaten erheben. In der Praxis findet § 21 nach Expertenmeinung jedoch nur zögerlich Anwendung.

Kriterium 5: Auslagerung Umweltbelastungen?

In Deutschland werden von den 2,87 Mio. t (2017) stofflich verwerteten Kunststoffabfällen etwa ein Fünftel (0,6 Mio. t) ins Ausland exportiert. 2019 lag die Exportmenge auf gleichem Niveau. Darunter sind sowohl Post-consumer als auch Produktions- und Verarbeitungsabfälle (conversio 2018, 2020). Kunststoffverpackungen machen etwa ein Drittel der jährlichen Exporte aus (ca. 0,2 Mio. t) (Schüler 2020).

Neben Abfällen werden (insbesondere aufgrund mangelnder Absatzmärkte im Inland) etwa 0,12 Mio. t Kunststoffrezyklate exportiert. Etwa 6 % der produzierten Kunststoffrezyklate werden demnach im Ausland verwendet (conversio 2018).

Die Entsorgungspraxis von Kunststoffabfällen ins Ausland und damit die Auslagerung entsprechender negativer Umweltauswirkungen ist auch in weiteren Ländern verbreitet. Seit 2021 gelten daher verschärfte Regeln für den Export schlecht recycelbarer Kunststoffabfälle aus der EU in Entwicklungsländer (EU Recycling + Umwelttechnik 2019).

Neben der Auslagerung von Umweltbelastungen implizieren die jährlichen Exportströme auch, dass aus wirtschaftlicher Perspektive kein Bedarf besteht, inländische Recyclinginfrastrukturen weiter auszubauen.

Kriterium 6: Nachweis möglich?

Das Kriterium wurde nicht analysiert.

4.3.9.3 Abschließendes Fazit

Auf Grundlage der untersuchten Kriterien (siehe Kapitel 4.3.9.2) lässt sich abschließend empfehlen, dass eine Substitutionsquote für Kunststoffabfälle geeignet ist, um die Nutzung von Primärrohstoffen (u.a. im Verpackungsbereich) zu schonen und von Sekundärrohstoffen zu fördern. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie ein möglichst hochwertiges Recycling von Kunststoffen wünschenswert, d.h. aus Plastikflaschen sollten möglichst wieder Plastikflaschen anstelle von Parkbänken hergestellt werden. Allerdings werden auch durch Downcycling-Aktivitäten substituierende Effekte erzielt und Primärmaterialien eingespart. Für Kunststoffe ist eine Substitutionsquote für Produktgruppen insbesondere aufgrund unsicherer Absatzmärkte und mangelnder Konkurrenzfähigkeit zu Primärmaterialien relevant. Ausreichende Mengen zur Produktion von Kunststoffrezyklaten sind verfügbar und weitere Potenziale können genutzt werden.

Durch die Implementierung einer Substitutionsquote würden inländische Recyclingkapazitäten gefördert, technische Möglichkeiten weiterentwickelt und der Auslagerung der Entsorgung von Kunststoffabfällen entgegengewirkt werden.

Die folgende Tabelle fasst die Analyse der Kriterien und Eignung einer Substitutionsquote zusammen.

Tabelle 17: Zusammenfassende Auswertung der Kriterien für Kunststoffverpackungen

Eignung SQ		Erläuterung
Kriterium 1) Einsatzbereiche vorhanden?	+	<p>Es zeigt sich, dass es diverse Einsatzbereiche für Kunststoffrezyklate gibt, u.a. auch im Verpackungsbereich. Die technische Rückführung in neue Produkte ist technisch für Kunststoffe mit hohem Reinheitsgrad möglich, bei Verbundstoffen nur eingeschränkt bzw. zukünftig nur mit sehr hohem Aufwand („chemisches“ Recycling) möglich (UBA 2019e).</p> <p>Für den Einsatz von Kunststoffrezyklaten im Verpackungsbereich muss beachtet werden, dass sich dieser in die Bereiche Lebensmittelverpackungen (44 %) und Nicht-Lebensmittelverpackungen (56 %) aufteilt (IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. 2020). Für Ersteren gelten hohe Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen, die eingehalten werden müssen. Derzeit bestehen noch große Hürden für den Einsatz von Rezyklaten im Lebensmittelbereich, insbesondere auch, weil Zulassungen für neue Rezyklate für Lebensmittelverpackungen nur zögerlich erteilt werden (Reitz 2019). Es ist jedoch zu sagen, dass zunächst die Potenziale der Non-Food-Verpackungen durch das Instrument einer Substitutionsquote ausgeschöpft werden können. Bei den Lebensmittelverpackungen ist der PET Stoffkreislauf wie er bspw. bei den bepfandeten PET Einweg- und Mehrwegflaschen praktiziert wird ein Vorzeigebeispiel.</p> <p>Die Betrachtung der Einsatzbereiche zeigt, dass eine Substitutionsquote (anwendungsbezogen) durchaus geeignet ist, da ausreichend Einsatzmöglichkeiten im Verpackungssegment als auch in weiteren Segmenten (Bau, Automobil, Elektronik und sonstige) bestehen. Prinzipiell wird der Einsatz bei den schnelldrehenden Produkten (wie Verpackung) sinnvoller betrachtet als Rezyklate in die anthropogenen Läger fließen zu lassen.</p>
Kriterium 2) Ausreichende Mengen verfügbar?	+ / o	<p>Die Ausbeute der stofflich verwerteten Kunststoffe zu Rezyklaten beläuft sich 2019 auf 87 %. Die Menge der bereits verfügbaren rezyklierbaren Kunststoffe kann demnach noch besser ausgenutzt und die Ausschöpfungsrates erhöht werden. Prinzipiell, steht eine ausreichende Menge Abfall zur Verfügung, um idealerweise einen Großteil davon einer möglichst hochwertigen Verwertung zuzuführen (insg. 6,3 Mio. t in 2019). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Qualität der Kunststoffabfälle (z.B. Mono- oder Verbundmaterialien) bei der Eignung für das Recycling eine entscheidende Rolle spielt und diese wie etwa bei</p>

Eignung SQ		Erläuterung
		<p>Verbundmaterialien einschränkt. Etwas weniger als die Hälfte (46 %) der Kunststoffabfälle wurde tatsächlich stofflich verwertet, davon fließen 0,6 Mio. t als Exporte ins Ausland. Wichtig ist, dass bereits bei der Produktion von Kunststoffen/Kunststoffverpackungen deren Recyclingfähigkeit berücksichtigt wird.</p> <p>Potenziale für stofflich verwertbare Kunststoffverpackungen liegen in bislang exportierten (recyclingfähigen) Kunststoffverpackungs-Abfallströmen (ca. 0,2 Mio. t in 2018), sowie Kunststoffverpackungsabfällen, die über den Restmüll entsorgt werden (ca. 0,8 Mio. Tonnen).</p>
Kriterium 3) Sinnvollere Anwendungen?	k. A.	Nicht analysiert
Kriterium 4) Preisverzer- rungen?	+	Die Marktsituation für Kunststoffrezyklate ist volatil, was langfristig Investitionen und Planungssicherheit erschwert. Aufgrund niedriger Preise für Primärkunststoffe ist der Einsatz von Kunststoffrezyklaten nicht wirtschaftlich und nicht konkurrenzfähig. Eine Substitutionsquote für Kunststoffe erzeugt eine Nachfrage und kann einen Absatzmarkt für Kunststoffrezyklate sicherstellen. Als weiterer Effekt würde durch eine Substitutionsquote erreicht werden, dass inländische Recyclingkapazitäten auf Basis einer verbesserten Planungssicherheit ausgebaut werden können. Gleichzeitig sollten Subventionen für Primärmaterialien gestrichen werden.
Kriterium 5) Auslagerung ins Ausland?	+	Vor dem Hintergrund etablierter Exportströme von Kunststoffabfällen ins Ausland und der Auslagerung von Umweltbelastungen sowie dem nicht genutzten Substitutionspotenzial produzierter Rezyklate, die exportiert werden, erscheint eine Substitutionsquote als geeignetes Instrument, um zum einen mehr Verantwortung zu übernehmen und zum anderen einen sicheren Absatzmarkt für bereits verfügbare Rezyklate zu schaffen.
Kriterium 6) Nachweis- pflicht mög- lich?	k. A.	Nicht analysiert

Legende: + = Kriterium trifft zu (SQ ist geeignet); o = ambivalente Aussage (ggf. sind differenziertere Aspekte zu berücksichtigen); - = Kriterium trifft nicht zu (SQ ist ungeeignet); k. A. = Kriterium wurde nicht analysiert bzw. ist für die Bewertung einer SQ nicht relevant

5 Fazit und Empfehlungen

Die Schonung von Primärrohstoffen ist ein wichtiges Ziel. Eine zunehmende Nutzung von Rezyklaten und Sekundärrohstoffen kann in einem erheblichen Umfang dazu beitragen, Primärrohstoffe zu substituieren und somit unerwünschte Umweltbelastungen zu mindern. Der Erfolg der Kreislaufwirtschaft muss dazu umfassend und an den richtigen Messstellen beobachtet werden. Ambitionierte Ziele ermöglichen oder beschleunigen die Nutzung von Sekundärrohstoffen.

In dieser Studie wurden unterschiedliche Kreislaufwirtschaftsindikatoren verglichen, dabei wurden Vor- und Nachteile identifiziert.

Darüber hinaus wurde die aktuelle **CMU für Deutschland**, differenziert nach Stoffströmen berechnet, mit und ohne Berücksichtigung der Rohstoffrucksäcke der Im- und Exporte. Die CMU von Deutschland liegt gegenwärtig bei rund 12 %, wenn die Rohstoffrucksäcke nicht berücksichtigt werden, und bei 11 %, wenn sie berücksichtigt werden. Deutschland liegt damit im europäischen Durchschnitt, in den vergangenen Jahren sind nur kleine Veränderungen zu beobachten. Die CMU kann mit verschiedenen Ansätzen gesteigert werden,

- indem die Menge der wiedergenutzten Abfälle gesteigert wird. Über alle Stoffgruppen und Produktgruppen sind Steigerungspotenziale zu finden, die eine Verbesserung der Sammlung, Trennung und der technischen Aufbereitung sowie des Designs für Recycling erfordern.
- indem die genutzte Primärrohstoffmenge gesenkt wird. Ein wichtiger Hebel ist die Energiewende. Darüber hinaus kann die Erhöhung des effizienten Einsatzes von Rohstoffen in der Produktion und in Dienstleistungen, eine verbesserte Produktqualität (zur Erhöhung der Langlebigkeit und Reparierbarkeit) und ein verändertes Konsumentenverhalten zu einer Minderung des Primärrohstoffkonsums beitragen. Einzelne Ansätze haben dabei beschränkte Auswirkungen, aber im Zusammenspiel können deutliche Steigerungen erreicht werden.

In dieser Studie wurde der Frage nachgegangen, ob eine **Substitutionsquote** oder andere Kreislaufwirtschaftsindikatoren geeignet sind, die Kreislaufführung von Rohstoffen zu fördern. Die Analyse verschiedener Kreislaufwirtschaftsindikatoren zeigte, dass jeder Indikator Vor- und Nachteile aufweist.

Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene liegen mit der Circular Material Use Rate (CMU) aus der EU, mit dem DIERec bzw. DERec aus Deutschland und einer (stoffspezifischen) Substitutionsquote drei Varianten für Deutschland vor. Vorteil der CMU ist, dass die Berechnung relativ eindeutig und europäisch weitgehend vergleichbar ist. Gleichzeitig wird mit der CMU nicht der tatsächliche Einsatz von Sekundärrohstoffen gemessen, sondern ein Proxy genutzt, von dem nicht genau bekannt ist, wie stark dieser die tatsächlich genutzten Sekundärrohstoffe überschätzt. Ein Vorteil des DIERec bzw. DERec ist die Quantifizierung der substituierten Primärrohstoffe. Leider ist der gegenwärtig vorliegende methodische Ansatz nicht konsistent mit ökonomieweiten Rohstoffrechnungen und somit sind die Ergebnisse nicht vergleichbar. Die Berechnung einer Substitutionsquote in methodisch konsistenter Form ist

möglich, aber – ebenso wie die Berechnungen des DIERec – gegenwärtig noch mit empirischen Lücken behaftet. Es wird empfohlen,

- zukünftig über Forschungsprojekte empirische Datenlücken zur Nutzung von Sekundärrohstoffen zu schließen. Dies betrifft insbesondere die Informationen zu Technologiemetallen und zu Baumaterialien.
- die methodische Entwicklung von konsistenten Herangehensweisen zur Berechnung von gesamtwirtschaftlichen Primär- und Sekundärstoffströmen zu fördern.
- die Vor- und Nachteile verschiedener Verrechnungsvorschriften einer gesamtwirtschaftlichen Substitutionsquote zu prüfen und eine Variante auszuwählen. Relevant aus unserer Sicht sollte dabei sein, dass Im- und Exporte ebenso wie die heimische Entnahme verrechnet werden (mit Rohstoffrucksäcken, in Rohmaterialäquivalenten). In Betracht kommen die konsumbezogene und die produktionsbezogene Variante. Die Verrechnung des Handels könnte konsistent mit den gesamtwirtschaftlichen Materialflussanalysen oder wie bei der CMU (ohne Importe, jedoch unter Verrechnung der Exporte) erfolgen.
- in Abhängigkeit des konkreten Indikators sollte eine ambitionierte Zielformulierung erfolgen. Das Ziel sollte regelmäßig und unter Berücksichtigung der Fortschritte der Recyclingindustrien fortgeschrieben werden. Das Ziel für beispielsweise eine produktionsbezogene Substitutionsquote (nach Variante 2 in Tabelle 5, vergleichbar DIERec/RMI) könnte mittelfristig bei 25 bis 30 % liegen.

Die Einführung einer Substitutionsquote bezogen auf einzelne Abfallfraktionen bzw. Stoffströme wurde anhand verschiedener Beispiele überprüft. In vielen, aber nicht allen Fällen ist eine Substitutionsquote ein geeignetes Instrument, mit dem die tatsächliche Nutzung von Sekundärrohstoffen unterstützt werden kann. Ein Vergleich der Effektivität unterschiedlicher Instrumente war nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Grundsätzlich sind folgende Prüfkriterien hilfreich, um die Eignung einer Substitutionsquote zu prüfen:

1. Existieren ökologisch unschädliche **Einsatzmöglichkeiten** für die Sekundärrohstoffe und können/sollen sie gezielt ausgeweitet werden?
2. Stehen **ausreichend recycelte Rohstoff-/Produktmengen** zur Verfügung oder können sie unter dem gegebenen technischen Entwicklungsstand absehbar zur Verfügung stehen? Je nach Transportaufwand muss die Menge national oder regional zur Verfügung stehen.
3. Ist die erforderliche Sekundärrohstoffmenge für die Quote erreichbar, ohne dass Stoffströme von einer **sinnvolleren Verwendung** (z.B. Reuse, Secondhand, Verwendungen, die höher in der Abfallhierarchie stehen) umgelenkt werden?
4. Kann eine Substitutionsquote dazu beitragen, zusätzliche Nachfrage zu generieren und Preiseffekte auszugleichen, falls der **Preis für Sekundärrohstoffe** höher als der Preis für Primärrohstoffe und dadurch die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen gering ist? Hierbei ist zu klären, ob die Preisdifferenz dadurch zu Stande kommt, dass für die Primärrohstoffe durch Subventionen gefördert werden oder Kostenvorteile durch nicht-eingepreiste ökologische Kosten entstehen. Anforderungen der internationalen Wettbewerbsfähigkeit können hierbei ebenso relevant sein.
5. Werden Abfälle oder (aufbereitete) Sekundärrohstoffe aufgrund von Absatzschwierigkeiten ins **Ausland verbracht** und dort nicht sachgerecht genutzt oder entsorgt?
6. Können **Nachweise** zum Einsatz von Sekundärrohstoffen von Produzenten erbracht werden?

Diese Prüfkriterien wurden in der Studie exemplarisch für Altbeton, Recyclinggips, Ziegel, Textilien, Komposte, Altpapier, Altholz und Kunststoffe angewendet.

- Eine Substitutionsquote für RC-Gesteinskörnung aus **Altbeton** zur Herstellung von R-Beton. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie eine hochwertige stoffliche Nutzung von Altbeton den derzeit etablierten Downcycling-Aktivitäten vorzuziehen. Zur Ausgestaltung der Substitutionsquote kann das bereits geltende (und derzeit in Überarbeitung befindliche) Regelwerk zur Beimischung von RC-GK für die R-Betonherstellung genutzt werden. Demnach wäre eine Substitutionsquote zwischen 25 – 45 % für RC-Gestein denkbar. Je nach Verfügbarkeit der RC-Gesteinskörnungsmengen kann die Quote schrittweise erhöht werden. Bei der Ausgestaltung der Substitutionsquote müssen regional verfügbare Mengen von RC-Gestein berücksichtigt werden und regionale Ausnahmeregelungen (z.B. gegen Nachweise) möglich sein.
- Kurz- bis mittelfristig ist eine Substitutionsquote zur Förderung der Nutzung von **Recyclinggips** geeignet. Gipsrecycling trägt zur Minderung des Extraktionsdrucks von Primärgips in oftmals geschützten Gebieten bei und kann zukünftig sinkende REA-Gipsmengen zumindest teilweise ersetzen. Eine Substitutionsquote sollte, aufgrund der (mittel bis langfristig) limitierten Verfügbarkeit an recyclingfähigem Material, zunächst niedrig angesetzt werden und schrittweise erhöht werden. Technische Fortschritte zum möglichen Gewichtsanteil von RC-Gips in Gipskartonplatten sollten ferner bei einer Festlegung der Quote berücksichtigt werden. Die Förderung der Wirtschaftlichkeit des Gips-Recyclings ist relevant, um die Qualität der Gipsabfälle ab der Baustelle zu erhöhen. Das Potenzial verfügbarer recyclingfähiger Gipsabfälle kann beispielsweise auch durch eine Gebührenerhöhung für eine Deponierung von gipshaltigen Abfällen und einem klaren Verbot der sonstigen Verwertung außerhalb Deutschlands unterstützt werden. Zudem gibt es im Rahmen der Produktverantwortung noch kein von der Gipsindustrie aufgebautes Rücknahmesystem, dieses sollte implementiert werden.
- **Ziegel** eignen sich aufgrund ihrer Bestandteile und physikalischen Eigenschaften nicht für einen erneuten Einsatz in der Ziegelproduktion. Eine Substitutionsquote im engeren Sinne (Rückführung in Produktion) ist nicht geeignet. Für Ziegel empfiehlt sich eine hochwertige Verwertung durch Einsatz als Bestandteil der RC-Gesteinskörnung für die R-Betonherstellung. Außerdem können Ziegel u.a. für die Substraterstellung eingesetzt werden. Eine Substitutionsquote im weiteren Sinne, die etwa den Ersatz von Primärmaterial für die Betonherstellung anstrebt, ist durchaus sinnvoll und umsetzbar. Auf diese Weise würde eine hochwertigere Verwertungsoption (anstelle dominierender Downcycling-Aktivitäten) gezielt gefördert.
- Eine Substitutionsquote, die den Einsatz von **Komposten** in der Substraterstellung fördert, kann den Einsatz von Torf mindern. Produktspezifikationen für Erden wie etwa Blumenerde, die im Hobbygartenbau zum Einsatz kommen, sind weniger spezifisch und anspruchsvoll als im gewerblichen Gartenbau oder der Landwirtschaft. Eine Substitutionsquote für (veredelte) Fertigkomposte im Hobbygartenbau oder in Erdenwerken ist daher prinzipiell denkbar und fördert eine Substitution von Torf als Substratbestandteil.

- Eine Substitutionsquote für **Alttextilien** ist nur bedingt geeignet. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie und bei den derzeit begrenzten technischen Möglichkeiten zur sortenreinen Faserrückgewinnung eine Wiederverwendung (Second-hand-Nutzung), wie sie derzeit dominiert, aus ökologischer Sicht wünschenswert. Ein Ansatzpunkt für eine Substitutionsquote als lenkendes Instrument könnte in der Herstellung von Dämmstoffen in Automobilen und Gebäuden liegen. Dieser Ansatz bedarf jedoch der weitergehenden Untersuchung. Zudem ist es sinnvoll, Rahmenbedingungen zu schaffen, die produzierenden Unternehmen verstärkt Anreize geben (sortenreine) Produktionsausschüsse (z.B. Baumwollgarn) aufzubereiten und diese einem erneuten Produktionsprozess zuzuführen. Technische Möglichkeiten sind gegeben. Inwiefern dies über eine Substitutionsquote effektiv gestaltet werden kann, ist auf Grundlage nur undifferenzierter Daten derzeit nicht klar zu beantworten.

Eine Substitutionsquote für Alttextilien ist grundsätzlich kein geeignetes Instrument, um die zentralen Herausforderungen des steigenden Aufkommens an Bekleidungstextilien durch den Fast Fashion Trend bei kontinuierlich abnehmenden Qualitäten und einem daraus resultierenden Mengenproblem entgegenzuwirken. An dieser Stelle müssen andere Lösungswege (Konsumentenbewusstsein, Verantwortlichkeiten in Bezug auf Abfall- und Müllproblematiken) erarbeitet werden.

- Eine Substitutionsquote für **Altholz** ist ein geeignetes Instrument, um im Sinne der Abfallhierarchie und auch aus ökobilanzieller Betrachtung (Kaskadennutzung) eine stoffliche Verwertung von Altholz zu fördern. Die stoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie hat eine substituierende Wirkung (von Primärholz) und sollte daher weiter ausgebaut werden. Große Potenziale bestehen in der Spanholzproduktion. Unter Berücksichtigung möglicher Schadstoffbelastungen und derzeit noch bestehender Herausforderungen bei der Altholzsammlung und Zuordnung zu Altholzkategorien, ist es empfehlenswert, eine Substitutionsquote kurzfristig moderater anzusetzen und sie mittelfristig zu steigern.

Eine Substitutionsquote für **Altpapier** ist prinzipiell geeignet, die Altpapiernutzung in bestimmten Papiersegmenten zu fördern. Grundsätzlich hat sich in der Praxis in Deutschland bereits eine stoffliche Nutzung und Verwertung von Papier, Karton und Pappe auf einem sehr hohen Standard etabliert und ist ein Beispiel für eine erfolgreiche Kaskadennutzung. Die bereits erreichte Altpapiereinsatzquote von 77,7 % lässt sich aus technischen Gründen nur bedingt weiter steigern. Für einzelne Papiersegmente, insbesondere für grafische Papiere und Hygienepapiere kann unter Berücksichtigung verfügbarer Altpapiermengen durch eine Substitutionsquote jedoch das noch vorhandene Potenzial ausgeschöpft werden.

- Eine Substitutionsquote für **Kunststoffe** ist geeignet, um die Nutzung von Primärrohstoffen zu schonen und Sekundärrohstoffe zu fördern. Grundsätzlich ist im Sinne der Abfallhierarchie ein möglichst hochwertiges Recycling von Kunststoffen wünschenswert. Allerdings werden auch durch Downcycling-Aktivitäten substituierende Effekte erzielt und Primärmaterialien eingespart. Für Kunststoffe ist eine Substitutionsquote für Produktgruppen insbesondere aufgrund unsicherer Absatzmärkte und mangelnder Konkurrenzfähigkeit zu Primärmaterialien relevant. Ausreichende Mengen zur Produktion von Kunststoffrezyklaten sind verfügbar und weitere Potenziale können genutzt werden. Durch die Implementierung einer Substitutionsquote würden inländische Recyclingkapazitäten gefördert werden, technische Möglichkeiten weiterentwickelt und der Auslagerung der Entsorgung von Kunststoffabfällen entgegengewirkt werden.

In der Regel, d.h. bei sehr vielen Stoffströmen, ist eine Substitutionsquote ein gutes Instrument, mit dem die Nutzung von vorhandenen bzw. erreichbaren RC-Materialien erfasst und mit einer Zielsetzung erhöht werden kann. Eine gleichzeitige Recyclingquote kann dazu beitragen, dass mehr Sekundärmaterial zur Verfügung steht. Gütenachweise (wie Zertifizierungen von Sekundärprodukten) sichern Qualität und können die Verbreitung der Nutzung und Akzeptanz von RC-Produkten unterstützen.

Eine Substitutionsquote kann in vielen Fällen ein hochwertiges Recycling fördern; in manchen Fällen kann ein „downcycling“ jedoch nicht vermieden werden, eine Substitutionsquote wäre in diesen Fällen unter Berücksichtigung möglichst hochwertiger Verwertungswege auszugestalten.

Literaturverzeichnis

AGEB (2019): AG Energiebilanzen e.V. | Bilanzen 1990-2017. <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.htmlx>. (04.12.2020).

Aktion Moorschutz (2021): Aktion Moorschutz fordert landesweiten Moorschutz! In: *Aktion Moorschutz*. <https://www.aktion-moorschutz.de/>. (22.03.2021).

Alwast, H. (2020): Umweltverträgliche Alternativen zum Abbau von Naturgips. Gutachten für den Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.–BUND. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/naturschutz/naturschutz_gipsgutachten.pdf (19.03.2021).

Basten, M. (2016): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Kreislaufwirtschaft Bau Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V. <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-11.pdf> (04.12.2020).

Basten, M. (2019): bbs-Zahlenspiegel 2019. Daten und Fakten zur Baustoff-, Steine-und-Erden-Industrie. https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Daten/Downloadarchiv/Konjunktur/Zahlenspiegel_2019.pdf (21.03.2021).

Basten, M. (2021): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-12.pdf> (19.03.2021).

BDE; Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (2020): BDE-Leitfaden zur Gewerbeabfallverordnung. https://www.bde.de/documents/160/200415_BDE_Leitfaden_GewAbfV_final.pdf. (19.11.2020).

BDE e.V. (2020): Umfrage: Rezyklatmarkt in der Corona-Krise flächendeckend eingebrochen. Umfrage des BDE zeigt starken Nachfragerückgang nach Kunststoffrezyklaten durch Corona-Krise - 18.08.2020. <https://www.bde.de/presse/umfrage-rezyklatmarkt-in-der-corona-krise-flaechendeckend-eingebrochen/>. (15.12.2020).

BKV; GVM (2020): Kurzfassung der Studie „Potenzial zur Verwendung von Recycling-Kunststoffen in der Produktion von Kunststoffverpackungen in Deutschland“. https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/2020_04_02_Kurzfassung_Endbericht_Potenzial_zur_Verwendung_von_Recycling-Kunststoffen_in_Kunststoffverpackungen_14-08-2020.pdf (04.12.2020).

BMEL (2019): Tagung „Torfminderung“ 18. und 19. Februar 2020, BMEL Berlin. Berlin. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torf-minderung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (04.12.2020).

BMELV (2012): 2012: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) BGBl. I 2012, Nr. 63, S. 2973-3012, ausgegeben am 31.12.2012, zuletzt geändert am 26. Mai 2017 durch Artikel 3 der Verordnung (BGBl. I S. 1305). https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/D%C3%BCMV.pdf (16.12.2020).

BMU (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. S. 144. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf (11.12.2020).

BMU (2020a): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III 2020 – 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. S. 87. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf (11.12.2020).

BMU (2020b): Altpapier Selbstverpflichtung. <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallarten-abfallstroeme/altpapier/abfallwirtschaft-altpapier-selbstverpflichtung/>.

Boldrin, A.; Hartling, K. R.; Laugen, M.; Christensen, T. H. (2010): Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growthmedia preparatio. In: *Resources, Conservation and Recycling*. No.50, S. 1250–1260.

Buchert, D. M.; Sutter, J. (2020): Stand und Perspektiven des Recyclings von Lithium-Ionen-Batterien aus der Elektromobilität. S. 16. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strategiepapier-Mercator-Recycling-Batterien.pdf> (04.12.2020).

Buchert, Dr. M.; Sutter, J.; Alwast, H.; Schütz, N.; Weimann, Dr. K. (2017): Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten. S. 110. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-04-24_texte_33-2017_gipsrecycling.pdf (04.12.2020).

BUND (2018): Torffrei gärtner: Moore und Klima schützen. In: *BUND - BUND für Naturschutz und Umwelt in Deutschland*. <https://www.bund.net/bund-tipps/detail-tipps/tip/torffrei-gaertner-moore-und-klima-schuetzen/>. (22.03.2021).

BUND (2020a): Wertvolle Rohstoffe schützen und einmalige Gipskarstlandschaft erhalten: BUND fordert Ausstieg aus Naturgipsabbau bis 2045. <https://www.bund.net/service/presse/pressemitteilungen/detail/news/wertvolle-rohstoffe-schuetzen-und-einmalige-gipskarstlandschaft-erhalten-bund-fordert-ausstieg-aus-naturgipsabbau-bis-2045/>. (19.03.2021).

BUND (2020b): BUND-Einkaufsführer für torffreie Erden. https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/naturschutz/naturschutz_einkaufsfuehrer_torffreie_erden.pdf (04.12.2020).

Bundesgütegemeinschaft Kompost (2020): Verwertung von Bioabfällen 2019. BGK Statistik https://www.kompost.de/fileadmin/user_upload/Dateien/HUK-Datien/2020/Q1_2020/Verwertung_von_Bioabfaellen_2019_HUK_Q1_2020.pdf (22.03.2021).

Bundesgütegemeinschaft Kompost (n.d.): Qualitätskriterium und Güterichtlinien - Substratkompost. https://www.kompost.de/fileadmin/docs/guetesicherung/GP_SK.pdf (22.03.2021).

Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. (2020): Status Quo und Perspektive. Reuse und Recycling von Ziegeln. https://www.ziegel.de/sites/default/files/2020-03/200305_Recyclingbroschuere_Layout_RZ_WEB%5B8526%5D.pdf. (04.12.2020).

bvse (2020): Textilstudie 2020. "Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland." https://www.bvse.de/dateien2020/1-Bilder/03-Themen_Ereignisse/06-Textil/2020/studie2020/bvse%20Alttextilstudie%202020.pdf. (04.12.2020).

bvse (n.d.): Der Weg der Altkleider von der Sammlung zur Wiederverwendung. In: <https://www.bvse.de>. <https://www.bvse.de/themen/geschichte-des-textilrecycling/der-weg-der-altkleider-von-der-sammlung-zur-wiederverwendung.html>. (04.12.2020.a).

bvse (n.d.): Das Altholz-Qualitätenverzeichnis. In: <https://www.bvse.de>. <https://www.bvse.de/themen-altholz-ersatzbrennstoffe-bioabfall/altholz-verwertung/altholz-qualitaetenverzeichnis.html>. (14.12.2020.b).

bvse (n.d.): Altholzmarkt 2016/2017. In: <https://www.bvse.de>. <https://www.bvse.de/themen-altholz-ersatzbrennstoffe-bioabfall/altholz-verwertung/marktbericht.html>. (14.12.2020.c).

bvse (n.d.): Altpapiernachfrage steigt tendenziell. <https://www.bvse.de/papier-recycling-2/markt-papier.html>. (23.03.2021.d).

bvse Fachverband Kunststoffrecycling (2019): Kunststoff-Rezyklateinsatz in Europa: Start der digitalen Monitoring-Plattform MORE. <https://www.bvse.de/gut-informiert-kunststoff-recycling/nachrichten-recycling/4423-kunststoff-rezyklateinsatz-in-europa-start-der-digitalen-monitoring-plattform-more.html>. (15.12.2020).

bvse Fachverband Mineralik - Recycling und Verwertung (2019): Recyclingmaterial zur Bedingung bei Ausschreibungen machen. <https://www.bvse.de/gut-informiert-mineralik/nachrichten-mineralik/5251-recyclingmaterial-zur-bedingung-bei-ausschreibungen-machen.html>. (14.12.2020).

Carlen, C.; Tschümperlin, L. (2019): Torfausstiegskonzept – Forschung und Umsetzung in der Schweiz. Tagung "Torfminderung" 18. und 19. Februar 2020 Berlin. S. 13. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torf-minderung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (22.03.2021).

conversio (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Kurzfassung_Stoffstrombild_2017_190918.pdf (15.12.2020).

conversio (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Kurzfassung_Stoffstrombild_2019.pdf (04.12.2020).

Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Krauß, N.; Gruhler, K. (2016): Zukunft Bauen. Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. S. 88. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf;jsessionid=35C89EC684106A4E36FA977B771761DF.live21302?__blob=publicationFile&v=1 (04.12.2020).

Destatis (2019a): Umwelt Abfallentsorgung 2017. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf?__blob=publicationFile (14.12.2020).

Destatis (2019b): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. CO₂-Gehalt der Güter der Endverwendung. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Publikationen/Downloads/co2-gehalt-gueter-endverwendg-xlsx-5851101.xlsx?__blob=publicationFile. (04.12.2020).

Destatis (2020a): Materialflüsse in Millionen Tonnen. In: *Statistisches Bundesamt*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Tabellen/material-energiefluesse.html>. (11.12.2020).

Destatis (2020b): Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten 2000 bis 2016. In: *Statistisches Bundesamt*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/rohstoffaequivalente-5853101169004.html>. (04.12.2020).

Destatis (2020c): Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) - 2018. S. 80. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile (22.03.2021).

Destatis (2020d): Material- und Energieflüsse. In: *Statistisches Bundesamt*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/_inhalt.html. (04.12.2020).

Destatis (2020e): Abfallwirtschaft. In: *Statistisches Bundesamt*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html. (04.12.2020).

Detzel, A.; Kauertz, B. (2019): Der (neue) Rechtsrahmen für VerpackungenImpulsvortrag zur VerpackGim Rahmen des PlastikNet, 8.4.2019. ifeu gGmbH. https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/08-04-2019_PlastikNet_VerpackG_Andreas_Detzel_ifeu.pdf (15.12.2020).

Deutscher Bundestag (2019): Entwicklung des Papierverbrauchs in Deutschland. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Bettina Hoffmann, Tabea Rößner, Lisa Badum, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/136/1913658.pdf> (11.11.2020).

Dittrich, Dr. M.; Kämper, C.; Ludmann, S.; Ewers, B.; Giegrich, J.; Sartorius, Dr. C.; Hummen, T.; Marscheider-Weidemann, Dr. F.; Schoer, Dr. K. (2018): Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess). S. 252. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-11_texte_29-2018_deteress.pdf (04.12.2020).

Dittrich, Monika; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020a): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe. UBA Climate Change 03/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_03-2020_endbericht_greenme.pdf (12.11.2020).

Dittrich, Monika; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife. UBA Climate Change 04/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_04-2020_endbericht_greenlife.pdf (12.11.2020).

Dittrich, Monika; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020c): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. UBA Climate Change 05/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_05-2020_endbericht_greensupreme.pdf (12.11.2020).

Dittrich, Monika; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020d): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_02-2020_endbericht_greenlate.pdf (12.11.2020).

Dittrich, Monika; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020e): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Vergleich der Szenarien. UBA-Texte 06/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, Frank; Becker, Sarah; Oehsen, Amany von; Vogt, Regine; Köppen, Susanne; Biemann, Kirsten; Böttger, Diana; Ewers, Birte; Limberger, Sonja; Frischmuth, Felix; Fehrenbach, Horst (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. UBA Climate Change 01/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_01-2020_endbericht_greenee.pdf (15.12.2020).

Dornbusch, Dr. H.-J.; Hannes, L.; Santjer, M.; Böhm, C.; Wüst, S.; Zwisele, Dr. B.; Kern, Dr. 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. S. 256. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_113-2020_analyse_von_siedlungsrestabfaellen_abschlussbericht.pdf (04.12.2020).

EC (2015): Closing the loop - an EU action plan for the Circular Economy. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF (11.12.2020).

EC (2017): Study on the review of the list of Critical Raw Materials. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en> (12.11.2020).

EC (2018a): Measuring progress towards circular economy in the European Union – Key indicators for a monitoring framework. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2018:17:FIN> (12.11.2020).

EC (2018b): Über einen Überwachungsrahmen für die Kreislaufwirtschaft. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0029&from=EN> (11.12.2020).

EC (2020a): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF (11.12.2020).

EC (2020b): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN> (16.12.2020).

EC (2021): Packt die Häuser schön warm ein! In: *Europäische Kommission - Aktionsplan für Öko-Innovationen*. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/about-eco-innovation/good-practices/anche-le-case-devono-vestirsi-bene_de. (22.03.2021).

EU Recycling + Umwelttechnik (2019): Export schlecht recycelbarer Kunststoffabfälle wird ab 2021 untersagt. <https://eu-recycling.com/Archive/23505>. (15.12.2020).

EU-Recycling (2017): Recycling von Ziegelbruch - EU-Recycling 09/2017. In: *MSV Mediaservice & Verlag GmbH*. <https://eu-recycling.com/Archive/16929>. (22.03.2021).

Eurometaux; Eurofer (2012): Recycling Rates for Metal. https://www.eurometaux.eu/media/1510/electroniversionrecyclingratesdec2012_eurometauxeurofer.pdf.

Eurostat (2018a): Economy-wide material flow accounts HANDBOOK. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9117556/KS-GQ-18-006-EN-N.pdf/b621b8ce-2792-47ff-9d10-067d2b8aac4b?t=1537260841000> (16.12.2020).

Eurostat (2018b): Circular material use rate - Calculation method. Luxembourg. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/9407565/KS-FT-18-009-EN-N.pdf/b8efd42b-b1b8-41ea-aaa0-45e127ad2e3f> (03.12.2020).

Eurostat (2020a): Material flow accounts statistics - material footprints. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Material_flow_accounts_statistics_-_material_footprints. (11.12.2020).

Eurostat (2020b): Recycling of biowaste. https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/cej_wm030/default/table?lang=en (25.11.2020).

Eurostat (2020c): Contribution of recycled materials to raw materials demand - end-of-life recycling input rates (EOL-RIR). https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/cej_srm010_esmsip2.htm (12.11.2020).

Eurostat (2020d): Circular material use rate. https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/cei_srm030/default/table?lang=en. (11.12.2020).

Eurostat (2020e): Material flows and resource productivity. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/material-flows-and-resource-productivity>. (14.12.2020).

Eurostat (n.d.): Guidance on the interpretation of the term backfilling. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/342366/4953052/Guidance-on-Backfilling.pdf/c18d330c-97f2-4f8c-badd-ba446491b47e> (10.12.2020).

EUWID (2019): EUWID-Preisspiegel: Altholz Deutschland 2007 – 2019. In: EUWID Recycling und Entsorgung, Gernsbach, Jahrgänge 2007-2019.

FAO (2020): Food Loss and Waste Database. In: *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <http://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/en/>. (04.12.2020).

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Kauertz, B.; Detzel, A.; Wellenreuther, F.; Breitmayer, E.; Essel, R.; Carus, M.; Kay, S.; Wern, B.; Baur, F.; Bienge, K.; von Geibler, J. (2017): BIOMASSEKASKADEN. Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_abschlussbericht.pdf (04.12.2020).

Flamme, S.; Hams, S.; Bischoff, J.; Fricke, C. (2020): Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung. S. 196. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_95-2020_evaluierung_der_altholzverordnung_im_hinblick_auf_eine_notwendige_novellierung.pdf (04.12.2020).

FÖP (2012): Papier - Wald und Klima schützen. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/papier_-_wald_und_klima_schuetzen-reich-art_1.pdf. (14.12.2020).

Free Vector Maps, Striped Candy LLC (n.d.): Map of Germany - 3D (DE-EPS-02-8001). <https://freevectormaps.com/germany/DE-EPS-02-8001>. (17.12.2020).

Friege, H. (2020): Leitfaden zur Wiederverwendung und Verwertung von Alttextilien. N³ Nachhaltigkeitsberatung; BASKINET; Akademie Dr. Obladen. https://www.bavweb.de/media/custom/2886_1406_1.PDF?1587474053 (04.12.2020).

Fromm, L. (2020): Bauschutt-Recycling auf hohem Niveau. <https://www.dabonline.de/2020/02/18/bauschutt-recycling-feess-kirchheim-beton-wiederverwertung-ziegel/>. (23.03.2021).

GewAbfVO (2017): Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV). https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/BJNR089600017.html (15.02.2021).

Greenpeace (2017): Konsumkollaps durch Fast Fashion. https://greenwire.greenpeace.de/system/files/2019-04/s01951_greenpeace_report_konsumkollaps_fast_fashion.pdf (04.12.2020).

Grimm, R. (2017): Naturdämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. In: *BaustoffWissen*. <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/daemmstoffe/naturdaemmstoffe-aus-nachwachsenden-rohstoffen-marktanteil-eigenschaften-brandverhalten/>. (22.03.2021).

Gruda, N. (2019): Einführung – Torfminderungsstrategie der Bundesregierung. Tagung “Torfminderung” 18. und 19. Februar 2020 Berlin. S. 5–6. https://www.bmel.de/Shared-Docs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torfminde-rung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (22.03.2021).

Heidelberger Zement AG; TU Kaiserslautern; RWTH Aachen; ifeu Heidelberg gGmbH; VDZ gGmbH; Fa. Scherer & Kohl (n.d.): Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation, derzeit laufendes vom BMBF gefördertes Forschungsprojekt. <https://www.r-beton.de/> (15.02.2021).

Heinrich Feess GmbH & Co. KG (2016): Deutscher Umweltpreis 2016. In: *feess*. <https://www.feess.de/neuigkeiten/deutscher-umweltpreis-2016.html>. (20.03.2021).

Heinrich Feess GmbH & Co. KG (2021): Recycling-Beton: Vom Bauschutt zum Baustoff. In: *feess*. <https://www.feess.de/neuigkeiten/recycling-beton-vom-bauschutt-zum-baustoff.html>. (23.03.2021).

Hemkhaus, M.; Hannak, J.; Malodobry, P.; Janßen, T.; Griefahn, N. S.; Linke, C. (2019): Circular Economy in the Textile Sector. giz GmbH. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/giz_report_circular_economy_textile_sector_2019_final.pdf (16.12.2020).

Hiratsuka, Jiro (2004): Japanese Initiative toward a Sound Material-Cycle Society. <http://www.gdrc.org/uem/waste/japan-3r/6-japanese-initiatives.pdf> (12.11.2020).

Hirschler, O.; Osterburg, B. (2019): Potenzialanalyse einer Torfminderung: Status-Quo über Torfmarkt und Klimawirkungen. Tagung “Torfminderung” 18. und 19. Februar 2020 Berlin. S. 6. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torfminde-rung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (22.03.2021).

ifeu Heidelberg gGmbH (2019a): Beton - Factsheet - Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_beton_fi_barrierefrei.pdf (16.02.2020).

ifeu Heidelberg gGmbH (2019b): Ziegel - Factsheet - Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von Metallen und mineralischen Baustoffen“. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_ziegel_fi.pdf (16.02.2020).

ifeu Heidelberg gGmbH (2019c): Gips - Factsheet - Erarbeitet im Projekt „Kartierung des Anthropogenen Lagers III – Etablierung eines Stoffstrommanagements unter Integration von Verwertungsketten zur qualitativen und quantitativen Steigerung des Recyclings von

Metallen und mineralischen Baustoffen“. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_gips_fi_barrierefrei.pdf (16.02.2020).

IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V. (2020): Die Zukunft von Kunststoffverpackungen ist zirkulär – auch ohne Quoten und Verbote. <https://newsroom.kunststoffverpackungen.de/2020/06/03/zukunft-kunststoffverpackungen-zirkulaer-ohne-quoten-mit-rezyklat/>. (15.12.2020).

Industrieverband Agrar e.V. (2018): Wichtige Zahlen Düngemittel - Produktion - Markt - Landwirtschaft. https://www.iva.de/sites/default/files/benutzer/%25uid/publikationen/wichtige_zahlen_2017-2018.pdf (22.03.2021).

Industrievereinigung Chemiefaser e.V. (2019): Faserverarbeitung nach Einsatzgebiet in Deutschland. <https://www.ivc-ev.de/de/faserverarbeitung-nach-einsatzgebiet-deutschland>. (04.12.2020).

InformationsZentrum Beton GmbH (n.d.): Beton. Die beste Wahl. Ein Faktencheck. <https://infob.de/pdf/2019-beton-die-beste-wahl.pdf> (14.12.2020).

Japan Industrial Waste Information Center (2018): Waste Management in Japan ~Rules and Figures. <https://www.jwnet.or.jp/assets/pdf/en/20190322133536.pdf>.

Japan Waste Management & 3Rs Research Foundation (2017): Country Chapter State of the 3Rs in Asia and the Pacific. [https://www.uncrd.or.jp/content/documents/5690\[Nov%202017\]%20Japan.pdf](https://www.uncrd.or.jp/content/documents/5690[Nov%202017]%20Japan.pdf) (12.11.2020).

Kaiser, C.; Niklasch, W.; Schöpgens, H.; Spritzendorfer, J.; Tuschinsk, M. (2019): MARKT-ÜBERSICHT - Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Zellulosedämmung: Alles übers Dämmen mit Zellulose. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch_Daemmstoffe_2020_web.pdf (22.03.2021).

Knappe, F.; Böß, A.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Vogt, R.; Dehoust, G.; Schüler, D.; Wiegmann, K.; Fritsche, U. (2007): Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle - UBA TEXTE 04/07. Umweltbundesamt. <https://d-nb.info/99039686X/34> (22.03.2021).

Knappe, F.; Joachim, R.; Kern, Dr. M.; Turk, T.; Raussen, T.; Kruse, S.; Hüttner, A. (2019): Ermittlung von Kriterien für eine hochwertige Verwertung von Bioabfällen und Ermittlung von Anforderungen an den Anlagenbestand. S. 150. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-22_texte_49-2019_verwertung-bio-abfaelle.pdf (04.12.2020).

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Schorb, Dr. A.; Theis, S.; Feeß, W.; Fritz, E.; Dziadek, B.; Lieber, R.; Landmann, M.; Mändle, J. (2017): Leitfaden zum Einsatz von R-Beton. S. 24. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden_R-Beton.pdf (04.12.2020).

Knappe, F.; Vogt, R.; Lazar, Dr. S.; Höke, Dr. S. (2012): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4310.pdf> (04.12.2020).

Knappe, F.; Vogt, R.; Turk, T.; Hüttner, A.; Dehoust, G.; Schneider, T. (2015): Hochwertige Verwertung von Bioabfällen. Ein Leitfaden. S. 148. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Leitfaden_Bioabfall.pdf (04.12.2020).

Knauf, M. (2017): Altholz stofflich nutzen oder thermisch verwerten? http://knauf-consulting.de/wp-content/uploads/2017/08/Marcus-Knauf-2017_Altholz-stofflich-nutzen-oder-thermisch-verwerten-Holz-Zentralblatt.pdf (24.03.2021).

Korolkow, J. (2015): Konsum, Bedarf und Wiederverwendung von Bekleidung und Textilien in Deutschland. https://www.bvse.de/images/pdf/Leitfaeden-Broschueren/150914_Textilstudie_2015.pdf. (04.12.2020).

Luyten-Naujoks, K. (2019): Kompost als Substratkomponente – Qualitäten und Potentiale. Tagung “Torfminderung” 18. und 19. Februar 2020 Berlin. S. 24–26. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torfmindering.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (22.03.2021).

Matthey, A.; Bünger, B. (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze Stand 12/2020. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf (23.03.2021).

Ministry of Environment Japan (2018): The 4th Fundamental Plan for Establishing a SoundMaterial-Cycle Society. https://www.env.go.jp/en/recycle/smcs/4th-f_Plan_outline.pdf.

Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Bolland, T. (2017): Urban Mining. Ressourcenschonung im Anthropozän. Umweltbundesamt. www.umweltbundesamt.de/publikationen/urban-mining-ressourcenschonung-im-anthropozan (04.12.2020).

NABU (2016): Torf gehört ins Moor! <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/naturschutz/moorschutz/160524-nabu-torffrei-hintergrund.pdf> (04.12.2020).

NABU (2021): NABU-Aktion: Wir gärtnern ohne Torf! In: *NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V.* <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/aktionen-und-projekte/torffrei-gaertnern/index.html>. (22.03.2021).

NABU (n.d.): Torf gehört ins Moor. Torfnutzung zerstört einzigartige Lebensräume – dabei gibt es längst Alternativen. In: *NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V.* <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/aktionen-und-projekte/torffrei-gaertnern/10866.html>. (04.12.2020).

Obermeier, Thomas; Lehmann, Sylvia (2018): Recycling-Quotenzauber – Schaffen wir in Deutschland die europäischen Recyclingziele? https://www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_059-078_Obermeier (12.11.2020).

Oebecke, A. (2020): Re-Use und Recycling von Ziegel-Produkten. In: *B - baulinks*. <https://www.baulinks.de/webplugin/2020/0298.php4>. (22.03.2021).

OECD (2019): Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en> (11.12.2020).

Petersen Tegl (2019): Ziegel und Nachhaltigkeit. In: *Petersen Tegl A/S*. (23.03.2021).

Pfoh, S.; Schneider, P.; Grimm, F. (n.d.): Projektplattform Energie - Leitfaden 01 Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile. Projektplattform Energie14Eine Kooperation des Bayerischen Bauindustrieverbandes e.V. und der Technischen Universität München. https://www.ppe.tum.de/fileadmin/w00bqx/www/content_uploads/151016_Leitfaden_OEkologische_Kenndaten.pdf (24.03.2021).

Pröll, M. (2020): Ziegel Lexikon Mauerwerk - Ausgabe 2020. Ziegel Zentrum Süd e.V., München. https://www.ziegel.de/sites/default/files/2020-01/2020_ZiegelLexikon.pdf (23.03.2021).

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - Rescue Studie. S. 444. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf (04.12.2020).

Raussen, T.; Richter, Dr. F.; Kern, Dr. M. (2019): Endbericht. Nährstoffrückführung durch Biogut- und Grüngutkomposte in den ökologischen Landbau Hessens (Öko-Kompost). https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/1023_endbericht_oeko-kompost_hessen_end.pdf (04.12.2020).

recyclingnews (2018): Urteil: Weniger Pflichten für Altkleider-Experteure. https://www.recyclingnews.de/politik_und_recht/urteil-weniger-pflichten-fuer-alkleider-experteure/. (14.12.2020).

Reitz, A. (2019): Hemmnisse für Rezyklateinsatz? In: *recyclingnews*. <https://www.recyclingnews.de/rohstoffe/hemmnisse-fur-rezyklateinsatz/>. (15.12.2020).

Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (2019): Substitutionsquote: Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/substitutionsquote-ein-realistischer> (11.12.2020).

Roth-Kleyer, S. (2018): Recyclingziegel für Vegetationssubstrate im GaLaBau. <https://neue-landschaft.de/artikel/recyclingziegel-fuer-vegetationssubstrate-im-galabau-8192.html>. (16.12.2020).

Sander, K.; Marscheider-Weidemann, F.; Wilts, H.; Hobohm, J.; Hartfeil, T.; Schöps, D.; Heymann, R. (2019): Abfallwirtschaftliche Produktverantwortung unter Ressourcenschutzaspekten (RePro). S. 577. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-24_texte_52-2019_repro.pdf (04.12.2020).

Schmidt, M.; Spieth, H.; Bauer, J.; Haubach, C. (2017): 100 Betriebe für Ressourceneffizienz - Band 1: Praxisbeispiele aus der produzierenden Wirtschaft. Springer Spektrum. <https://www.springer.com/de/book/9783662533666> (04.12.2020).

Schmidt, T. G.; Schneider, F.; Leverenz, D.; Hafner, G. (2019): Lebensmittelabfälle in Deutschland - Baseline 2015. Johann Heinrich von Thünen-Institut, DE. <https://doi.org/10.3220/REP1563519883000> (04.12.2020).

Schneider, K. (2020): Zellulosedämmung: Alles übers Dämmen mit Zellulose. In: *Wohnglück*. <https://wohnglueck.de/artikel/zellulosedaeimmung-32030>. (23.03.2021).

Schoer, K.; Dittrich, M.; Ewers, B.; Limberger, S.; Kovanda, J.; Weinzettel, J.; Moll, S.; Bouwmeester, M. (2020): Handbook for estimating raw material equivalents of imports and exports and RME-based indicators on the country level - based on Eurostat's EU RME model. Eurostat, Luxembourg. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6874172/Handbook-country-RME-tool> (03.12.2020).

Schöpfel, M.; Plocher, A.; Burgstaller, M.; Joas, A.; Blepp, M.; Krueger, N.; Hofbauer, W.; Thiel, A. (2018): Weiterentwicklung des Umweltzeichens Blauer Engel für Wärmedämmverbundsysteme: Kriterien für Dämmstoffe sowie biozidfreie Putze und Beschichtungen - UBA TEXTE 30/2018. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-01_texte_30-2018_waermedaemmverbundsysteme_korr.pdf (22.03.2021).

Schüler, K. (2020): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2018. UBA TEXTE 166/2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_166-2020_aufkommen_und_verwertung_von_verpackungsabfaellen_in_deutschland_im_jahr_2018.pdf (15.12.2020).

SenUVK (n.d.): Abfallstrategie - Einsatz von RC-Ziegel (Recycling-Ziegel) bei öffentlichen Baumaßnahmen im Land Berlin. <https://www.berlin.de/senuvk/umwelt/abfall/rc-ziegel/index.shtml>. (23.03.2021).

SK-Tex (2019): SK-Tex - We give textiles a new life. <http://www.sk-tex.com/>. (23.03.2021).

Steffen, Friedrich (2018): Steigerung der Prozesseffizienz in der Altpapieraufbereitung durch biotechnologische Behandlung der Deinkingschlämme. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/bitstream/ediss/8033/1/Dissertation.pdf>.

Steger, S.; Ritthoff, M.; Bulach, W.; Schüler, D.; Kosińska, I.; Degreif, S.; Dehoust, G.; Bergmann, T.; Krause, P.; Oetjen-Dehne, R. (2019): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-27_texte_34-2019_sekundaerrohstoffwirtschaft.pdf (11.12.2020).

Stucki, M. (2019): Torf und Ersatzstoffe im Ökobilanzvergleich. Tagung "Torfminderung" 18. und 19. Februar 2020 Berlin. S. 26–27. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torfminde-rung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (22.03.2021).

UBA (2016a): Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes - Position // Oktober 2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/170601_uba_pos_kunststoffrecycling_dt_bf.pdf (15.12.2020).

UBA (2016b): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland: Aktualisierte Ausgabe 2016. Dessau-Rosslau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_fachbroschuere_umweltschaedliche-subventionen_bf.pdf (22.10.2020).

UBA (2018a): Recycling. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/what_matters_1-2018_recycling_190319.pdf (18.11.2020).

UBA (2018b): Schwerpunkt Recycling. Das Magazin des Umweltbundesamtes 1/2018. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/publikationen/uba_sp_recycling_01-2018_web.pdf (15.12.2020).

UBA (2019a): Papiererzeugung, Papierverbrauch und Altpapierverbrauch. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/tab-papiererzeugung-papierverbrauch>.

UBA (2019b): Ziegel.Factsheet. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_ziegel_fi.pdf. (04.12.2020).

UBA (2019c): Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>. (14.12.2020).

UBA (2019d): Kunststoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/kunststoffe?parent=71842#hinweise-zum-recycling>. (15.12.2020).

UBA (2019e): Recycling: Verbesserungsbedarf bei Kunststoffabfällen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/recycling-verbesserungsbedarf-bei>. (15.12.2020).

UBA (2020a): Trends der Lufttemperatur. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur>. (11.12.2020).

UBA (2020b): Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2018. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_166-2020_aufkommen_und_verwertung_von_verpackungsabfaellen_in_deutschland_im_jahr_2018.pdf.

UBA (2020c): Indikator: Recycling von Siedlungsabfällen. <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-recycling-von-siedlungsabfaellen#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten>. (12.11.2020).

UBA (2020d): Glas und Altglas. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas>. (04.12.2020).

UBA (2020e): Altpapier. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier>. (04.12.2020).

UBA (2020f): Wohnfläche. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#zahl-der-wohnungen-gestiegen>. (15.12.2020).

UBA (2020g): Papier, Recyclingpapier - Hintergrund. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/haushalt-wohnen/papier-recyclingpapier/#unsere-tipps>. (14.12.2020).

UBA (2021): Bioabfälle. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bioabfaelle>. (04.12.2020).

Umweltbundesamt (2015): Da ist mehr drin! Über die optimale Verwertung von Bioabfällen. <https://www.cleaner-production.de/index.php/de/newsletter/archive/view/listid-2/mailid-14-cpg-newsletter?tmpl=component> (15.12.2020).

Umweltruf.de (2018): Anforderungen an die Erfassung, Sortierung und Verwertung von Alttextilien. Entwurf. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjLodr-rJtAhVFyYUKHZImB-UQF-jAFegQICBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.umweltruf.de%2F2019_doku%2F181024_Anforderungen%2520an%2520die%2520Textilverwertung%2520_LAGA.doc&usq=AOvVaw2_FSPvXZCz4KRlWpoLHehM (04.12.2020).

UNEP (2011): Recycling Rates of Metals A Status Repor. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8702/Recycling_Metals.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

UNEP (2020): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. International Resource Panel und United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. <https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change> (11.12.2020).

VCI (2020): Daten und Fakten. Rohstoffbasis der Chemieindustrie. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-chemieindustrie.pdf> (04.12.2020).

VDP (2020): Papier Kompass. https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07_Dateien/7_Publikationen/Kompass_de.pdf (19.11.2020).

VDP (n.d.): Fragen und Antworten rund ums Altpapier. https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07_Dateien/7_Publikationen/Papierrecyclen.pdf (22.03.2021).

Wegener, U. (2019): Alternative Substratausgangsstoffe - Qualitätsanforderungen und Verfügbarkeit. Tagung "Torfminderung" 18. und 19. Februar 2020 Berlin. S. 23–24. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Pflanzenbau/Gartenbau/tagungsband-torf-minderung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (22.03.2021).

Wilts, H.; Lucas, R.; von Gries, N.; Zirngiebl, M. (2014): Recycling in Deutschland - Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Eine Studie im Auftrag der KfW-Bankengruppe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH. <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/SuM-Recycling-in-Deutschland-Wuppertal-Institut-Januar-2015.pdf> (12.11.2020).

WWF (2019): Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. Hintergrund und Handlungsoptionen. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf (04.12.2020).

Yolin, Christine (2015): Waste Management and Recycling in Japan Opportunities for European Companies. https://www.eu-japan.eu/sites/default/files/publications/docs/waste_management_recycling_japan.pdf (12.11.2020).