

## Abschlussbericht

# REFINE: Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland

## Teilbericht Rohstoffe

von:

Dr. Monika Dittrich, Florian Petri, Birte Ewers, Anja Doppelmayr, Sonja Limberger, Axel Liebich,  
Regine Vogt

ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg

Dr. Karl Schoer

Schoer-Consult, Wiesbaden

Dr. Antonia Loibl, Dr. Frank Marscheider-Weidemann, Leon Rostek, Clemens Brauer

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Johannes Müller

ecoinvent Association, Zürich

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



TEXTE 129/2025

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,  
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 31 103 0

FB001460

Abschlussbericht

# **REFINE: Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland**

Teilbericht Rohstoffe

von

Dr. Monika Dittrich, Florian Petri, Birte Ewers, Anja  
Doppelmayr, Sonja Limberger, Axel Liebich, Regine Vogt  
ifeu – Institut für Energie und Umweltforschung, Heidelberg

Dr. Karl Schoer  
Schoer-Consult, Wiesbaden

Dr. Antonia Loibl, Dr. Frank Marscheder-Weidemann, Leon  
Rostek, Clemens Brauer  
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung  
ISI, Karlsruhe

Johannes Müller  
ecoinvent Association, Zürich

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## **Impressum**

### **Herausgeber**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### **Durchführung der Studie:**

Institut für Energie- und Umweltforschung - ifeu  
Wilckensstr. 3  
69120 Heidelberg

### **Abschlussdatum:**

Februar 2024

### **Redaktion:**

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,  
Ressourcenschonung  
Jens Günther

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

**Kurzbeschreibung: REFINE: Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland – Teilbericht Rohstoffe**

Die Defossilisierung der Energiesysteme ist ein zentraler Baustein für die Transformation zu einer klimaneutralen Gesellschaft. Für diesen erheblichen Um- und Ausbau der Infrastruktur werden nicht nur Emissionen bei der Herstellung der Technologieanlagen verursacht, sondern auch viele Rohstoffe benötigt. Diese Studie geht der Frage nach, welche Rohstoffbedarfe genau damit verbunden sind. Wie ändert sich der Rohstoffbedarf Deutschlands für relevante Rohstoffe und wie entwickelt sich der Bedarf in Regionen außerhalb Deutschlands? Stehen die benötigten Rohstoffe in ausreichender Menge zur Verfügung? Welche Umweltkosten entstehen im Rahmen unterschiedlicher Transformationspfade?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zwei verschiedene methodische Ansätze angewendet. Die (Weiter-)Entwicklung des multiregionalen Modells URMOD-3R liefert Abschätzungen zu den gesamtökonomischen Rohstoffbedarfen, dem Rohstofffußabdruck (RMC). Für die Abschätzung der Rohstoffbedarfe ausgewählter Schlüsseltechnologien wurde zudem zusätzlich ein prospektives Ökobilanzmodell basierend auf ecoinvent Datensätzen (Dittrich et al. 2024b; Liebich et al. 2023) ausgewertet. Zentrale Erkenntnisse dieser Untersuchung sind: Mit einer ambitionierten Transformation kann in Deutschland der Primärrohstoffkonsum bis 2050 um 55 % auf 7,9 t RME pro Kopf reduziert werden. In der EU ohne Deutschland geht der RMC pro Kopf langsamer zurück und liegt 2050 bei 13,1 t RME. In der Welt ohne EU besteht Aufholbedarf und der Bedarf steigt auf 12,6 t RME pro Kopf bis 2050. In den betrachteten Transformationspfaden macht der Rohstoffbedarf für die Schlüsseltechnologien einen überschaubaren Anteil am RMC aus und stellt damit kein Hindernis für eine ambitionierte und schnelle Umsetzung der Energiewende dar. Die Quantifizierung der Umweltkosten zeigt den gesellschaftlichen Nutzen einer schnellen und umfassenden Transformation.

**Abstract: REFINE: Consideration of raw material demand and environmental impacts for the energy transition in a resource-saving and greenhouse gas-neutral Germany – sub-report on raw materials**

The defossilisation of energy systems is a key element for the transformation to a climate-neutral society. This substantial restructuring and expansion of the infrastructure does not only cause emissions during the production of the technological facilities, but also requires a significant amount of raw materials. This study examines the question of what raw material demand is associated with this transformation path. How is Germany's raw material consumption for relevant raw materials changing and how is demand developing in regions outside Germany? Are the required raw materials available in sufficient quantities? What are the environmental costs associated with different transformation paths?

Two different methodological approaches were used to answer these questions. The (further) development of the multiregional model URMOD-3R provides estimates of the overall economic raw material consumption, the raw material footprint (RMC). Additionally, a prospective life cycle assessment model, based on ecoinvent data(Dittrich et al. 2024b; Liebich et al. 2023) was analysed separately to estimate the raw material requirements of selected key technologies. The key findings of this study are: With an ambitious transformation, primary raw material consumption in Germany can be reduced by 55 % to 7.9 tonnes of RME per capita by 2050. In the EU excluding Germany, RMC per capita is declining more slowly and will be 13.1 tonnes of RME in 2050. In the world excluding the EU, there is a need to catch up and material consumption will rise to 12.6 tonnes of RME per capita by 2050. In the transformation paths considered, the raw material demand for the key technologies accounts for a manageable

proportion of RMC and therefore does not represent an obstacle to an ambitious and rapid implementation of the energy transition. The quantification of the environmental costs shows the social benefits of a rapid and comprehensive transformation.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	11
Tabellenverzeichnis .....	13
Abkürzungsverzeichnis .....	16
Zusammenfassung .....	19
Summary .....	29
1 Einführung .....	39
2 Zum Projekt .....	41
3 Überblick über die Szenarien .....	42
3.1 GreenSupreme .....	42
3.2 GreenLate .....	43
3.3 Das Wasserstoffszenario TN-H <sub>2</sub> -G .....	44
3.4 Szenarien für Europa (ohne Deutschland) und die Welt (ohne Europa) .....	46
4 Methodik des umweltökonomischen Ressourcenmodells URMOD-3R .....	48
4.1 Basismodell für das Jahr 2010 .....	48
4.1.1 Konzept für das Basismodell .....	48
4.1.2 Berechnungsmethoden und Berechnungsgrundlagen .....	52
4.1.2.1 Nationale monetäre Input-Output-Tabellen (IOT) .....	52
4.1.2.2 Monetäres drei-Regionen-IO Modell nach 182 Gütergruppen .....	52
4.1.2.3 Hybrides drei-Regionen-IO Modell nach 299 Gütergruppen je Region .....	54
4.2 Szenario-Modell für die Jahre 2030, 2040 und 2050 .....	56
4.2.1 Konzept Szenario-Modell .....	56
4.2.2 Ableitung der Szenario-Annahmen .....	57
4.2.2.1 Matrix der letzten inländischen Verwendung (LIV) .....	57
4.2.2.2 Matrix der Güterinputkoeffizienten .....	60
5 Berechnungsergebnisse des umweltökonomischen Ressourcenmodells URMOD-3R .....	69
5.1 Einleitung .....	69
5.2 Deutschland im Weltvergleich .....	69
5.3.1 Überblick Ergebnisse Primärrohstoffkonsum (RMC) .....	71
5.3.2 Generelle Bestimmungsgründe für die Entwicklung des RMC .....	73
5.3.3 RMC nach Hauptverwendungskategorien .....	75
5.3.4 Rohstoffkonsum für Schlüsseltechnologien .....	76
5.5 Metallische Primär- und Sekundärressourcen und Recycling sonstiger Materialien .....	80
5.5.1 Metalle .....	80

5.5.2	Sonstige Materialien .....	83
5.6	Sensitivität Metallrecycling .....	84
5.7	Vergleich der Szenarien .....	85
5.8	Zwischenfazit URMOD-3R .....	90
6	Rohstoffe in den Schlüsseltechnologien .....	93
6.1	Vorgehen zur Berechnung der Rohstoffe für Schlüsseltechnologien .....	93
6.2	Windenergieanlagen onshore .....	96
6.2.1	Rohstoffe in ST .....	96
6.2.2	Rohstoffe je Szenario .....	98
6.3	Windenergieanlagen offshore .....	99
6.3.1	Rohstoffe in ST .....	99
6.3.2	Rohstoffe je Szenario .....	102
6.4	Photovoltaik Dachanlage .....	103
6.4.1	Rohstoffe in ST .....	104
6.4.2	Rohstoffe je Szenario .....	105
6.5	Photovoltaik Freiflächenanlage .....	108
6.5.1	Rohstoffe in ST .....	108
6.5.2	Rohstoffe je Szenario .....	110
6.6	Wärmepumpen .....	112
6.6.1	Rohstoffe in ST .....	112
6.6.2	Rohstoffe je Szenario .....	113
6.7	Elektrolyse .....	115
6.7.1	Rohstoffe in ST .....	115
6.7.2	Rohstoffe je Szenario .....	116
6.8	Methanisierung .....	121
6.8.1	Rohstoffe in ST .....	121
6.8.2	Rohstoffe je Szenario .....	122
6.9	Methanolsynthese .....	123
6.9.1	Rohstoffe in ST .....	124
6.9.2	Rohstoffe je Szenario .....	124
6.10	FT-Synthese .....	126
6.10.1	Rohstoffe in ST .....	127
6.10.2	Rohstoffe je Szenario .....	127
6.11	Solarthermische Kraftwerke .....	130

6.11.1	Rohstoffe in ST .....	131
6.11.2	Rohstoffe je Szenario .....	131
6.12	Brennstoffzellen .....	133
6.12.1	Rohstoffe in ST .....	134
6.12.2	Rohstoffe je Szenario .....	137
6.13	Geothermie .....	138
6.13.1	Rohstoffe in ST .....	139
6.13.2	Rohstoffe je Szenario .....	139
6.14	Energiespeicher .....	141
6.14.1	Rohstoffe in ST .....	141
6.14.2	Rohstoffe je Szenario .....	142
6.15	CO <sub>2</sub> -Bereitstellung .....	143
6.15.1	Rohstoffe in ST .....	144
6.15.2	Rohstoffe je Szenario .....	144
6.16	Meerwasserentsalzungsanlagen .....	146
6.16.1	Rohstoffe in ST .....	147
6.16.2	Rohstoffe je Szenario .....	147
6.17	Zusammenfassung und Zwischenfazit .....	150
6.17.1	Gesamtrohstoffnachfrage für alle (betrachteten) Schlüsseltechnologien in Szenarien und Jahren und Regionen .....	150
6.17.2	Rohstoffaufwand für PtX-Importe .....	155
6.17.3	Bewertung: Stehen die Rohstoffe zur Verfügung? .....	159
6.17.4	Vergleich URMOD-3R und Auswertung nach Bottom-up-Ansatz .....	162
6.17.5	Zwischenfazit .....	164
7	Umweltkosten der Transformationspfade .....	167
7.1	Vorgehen und Datengrundlage zur Berechnung der Umweltkosten .....	167
7.2	Ergebnisse Umweltkosten .....	169
8	Zusammenfassung und Fazit .....	174
9	Quellenverzeichnis .....	181
A	Anhang Kapazitäten der Schlüsseltechnologien .....	190
A.1	Windenergieanlagen onshore .....	190
A.2	Windenergieanlagen offshore .....	191
A.3	Photovoltaik Dachanlagen .....	191
A.4	Photovoltaik Freiflächenanlagen .....	192

A.5	Wärmepumpen .....	193
A.6	Elektrolyse .....	193
A.7	Methanisierung .....	194
A.8	Methanolsynthese .....	195
A.9	FT-Synthese .....	195
A.10	Solarthermische Kraftwerke .....	196
A.11	Brennstoffzellen .....	197
A.12	Geothermie .....	198
A.13	Energiespeicher .....	198
A.14	CO2-Bereitstellung .....	199
A.15	Meerwasserentsalzungsanlagen .....	199
B	Rohstoffbedarfe .....	200
B.1	Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien .....	200
C	Anhang Rezyklateinsatzquoten .....	201
C.1	Sekundärmetallanteile .....	201

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Leontief-Modell zur Allokation von Primärrohstoffen und weiteren Ressourcen auf die Güter der letzten inländischen Verwendung (LIV) - Schematische Darstellung .....	48
Abbildung 2:	Primärrohstoffkonsum (RMC) 2010 und 2050 der drei Regionen in GreenSupreme.....	70
Abbildung 3:	Anteile Deutschlands an der Welt in 2010 und in 2050 im Szenario GreenSupreme .....	70
Abbildung 4:	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf im Szenario GreenSupreme nach Jahren .....	71
Abbildung 5:	BIP pro Kopf in den Szenarien GreenSupreme (und H <sub>2</sub> ).....	72
Abbildung 6:	Weltweiter Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien in GreenSupreme im Jahr 2050 .....	76
Abbildung 7:	Entwicklung fossiler und erneuerbarer Energieressourcen in GreenSupreme .....	77
Abbildung 8:	Veränderung des Einsatzes ausgewählter Primär- und Sekundärmetalle (Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium) 2050 ggü. 2010 in GreenSupreme.....	80
Abbildung 9:	Entwicklung der Sekundär- und Primärmetallbedarfe von Eisen, Kupfer und Aluminium, Sekundäranteil in % (2010=100) in GreenSupreme .....	82
Abbildung 10:	Veränderung des Einsatzes ausgewählter Primär- und Sekundärmaterialien 2050 zu 2010 (2010=100) in GreenSupreme .....	83
Abbildung 11:	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf im Szenarienvergleich .....	86
Abbildung 12:	Energieressourcen pro Kopf im Szenarienvergleich.....	88
Abbildung 13:	Primäre erneuerbare Energieressourcen pro Kopf im Szenarienvergleich.....	89
Abbildung 14:	Einsatz ausgewählter Primär- und Sekundärmetalle (Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium) pro Kopf im Szenarienvergleich.....	90
Abbildung 15:	Rohstoffbedarf für zugebaute Onshore-WEA .....	99
Abbildung 16:	Rohstoffbedarf für zugebaute Offshore-WEA.....	103
Abbildung 17:	Rohstoffbedarf für zugebaute PV-Dachanlagen.....	107
Abbildung 18:	Rohstoffbedarf für zugebaute PV-Freiflächenanlagen.....	111
Abbildung 19:	Rohstoffbedarf für die Produktion von Wärmepumpenanlagen .....	114
Abbildung 20:	Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt, nach Nutzungsart .....	117
Abbildung 21:	Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt, nach Produktionsort.....	118

Abbildung 22:	Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff als Zwischenprodukt für PtX, nach Produktionsort.....	120
Abbildung 23:	Rohstoffbedarf für die Produktion von PtG-Methan, nach Produktionsort.....	123
Abbildung 24:	Rohstoffbedarf für die Produktion von PtL-Methanol, nach Nutzungsort.....	125
Abbildung 25:	Rohstoffbedarf für die Produktion von PtL-Methanol, nach Produktionsort.....	126
Abbildung 26:	Rohstoffbedarf für die Produktion von FT-Produkten, nach Nutzungsort.....	128
Abbildung 27:	Rohstoffbedarf für die Produktion von FT-Produkten, nach Produktionsort.....	130
Abbildung 28:	Rohstoffbedarf für die Produktion von CSP-Strom über Solarturm-Kraftwerke.....	132
Abbildung 29:	Rohstoffbedarf für die Produktion von CSP-Strom über Parabolrinnen-Kraftwerken.....	133
Abbildung 30:	Rohstoffbedarfe für die Nutzung von PEMFC (für den Verkehr) .....	137
Abbildung 31:	Rohstoffbedarfe für die Nutzung von SOFC/PEMFC (zur stationären Stromerzeugung) .....	138
Abbildung 32:	Rohstoffbedarf für Geothermieanlagen 2030 bis 2050 .....	140
Abbildung 33:	Rohstoffbedarf für die Produktion von Energiespeichern im GreenLate-Szenario .....	143
Abbildung 34:	Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von DAC-CO <sub>2</sub> , nach Nutzungsort.....	145
Abbildung 35:	Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von DAC-CO <sub>2</sub> , nach Produktionsort.....	146
Abbildung 36:	Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen, nach Nutzungsort.....	148
Abbildung 37:	Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen, nach Produktionsort .....	149
Abbildung 38:	Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien .....	151
Abbildung 39:	Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien differenziert nach Rohstoffen .....	153
Abbildung 40:	Rohstoffaufwendungen der PtX-Importe (nach Nutzungsort) .....	157
Abbildung 41:	Rohstoffaufwand durch PtX-Importe differenziert nach Rohstoffen .....	159
Abbildung 42:	Globaler Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien als %-Anteil der weltweiten Förder-/Produktionsmenge im Jahr 2022.....	161
Abbildung 43:	Klimawandel (GWP100) und Feinstaubbelastung (PM2,5e) in Deutschland in den Szenarien .....	169

Abbildung 44:	Durch Deutschland verursachte Umweltkosten aufgrund von Treibhausgasemissionen differenziert nach Regionen und Szenarien gemäß 1 % reiner Zeitpräferenzrate in Euro .....	170
Abbildung 45:	Durch Deutschland verursachte Umweltkosten aufgrund von Treibhausgasemissionen differenziert nach Regionen und Szenarien gemäß 0 % reiner Zeitpräferenzrate in Euro .....	171
Abbildung 46:	Global verursachte Umweltkosten durch Treibhausgasemissionen gemäß 0 % und 1 % reiner Zeitpräferenzrate in Euro .....	172
Abbildung 47:	Durch Deutschland verursachte Umweltkosten der Feinstaubbelastung (PM2,5) differenziert nach Region in Euro .....	173

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Annahmen zu den jährlichen durchschnittlichen Wachstumsraten .....	58
Tabelle 2:	Veränderung des BIP gegenüber 2010 (2010 = 1).....	58
Tabelle 3:	Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung .....	59
Tabelle 4:	Zusammenfassung der für REFINE angenommenen Sekundäranteile der untersuchten Metalle für alle Regionen und Jahre in GreenSupreme .....	63
Tabelle 5:	Zusammenfassung der für REFINE ermittelten Sekundäranteile für Kunststoffe für alle Regionen, Jahre und Szenarien .....	65
Tabelle 6:	Übersicht unterschiedlicher RC Quoten und relative Differenz zu GreenSupreme Sekundäranteilen (Welt ohne EU).....	67
Tabelle 7:	Sekundärmetallanteile in 2050 in GreenSupreme in der Sensitivitätsberechnung .....	68
Tabelle 8:	Überblick über die Nutzung von Primärrohstoffen gemäß GreenSupreme .....	73
Tabelle 9:	Simulation des Einflusses des Nachfrage- und des Technologieeffekts auf den RMC .....	74
Tabelle 10:	Anteile der Kategorien der letzten inländischen Verwendung am Primärrohstoffkonsum (RMC) in GreenSupreme (in Prozent) .....	75
Tabelle 11:	Fossile und erneuerbare Energieressourcen 2010 und 2050 in GreenSupreme .....	78
Tabelle 12:	Primär- und Sekundärmetalle in 2010 und in 2050 im Szenario GreenSupreme .....	81
Tabelle 13:	Primär- und Sekundärmaterialien in 2010 und in 2050 im Szenario GreenSupreme .....	84

Tabelle 14:	Veränderung Primärrohstoffbedarf in der Sensitivität „Verminderung der RC-Quoten um 50 % - Deutschland 2050 (in 1000 t RME) .....	85
Tabelle 15:	Weltweiter Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien im Jahr 2050.....	87
Tabelle 16:	Auswahl der betrachteten Materialien .....	94
Tabelle 17:	Auswahl der betrachteten Schlüsseltechnologien .....	95
Tabelle 18:	Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus Onshore-WEA .....	97
Tabelle 19:	Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus Offshore-WEA.....	100
Tabelle 20:	Rohstoffbedarf in kg pro PV-Dachanlage (20,8 m <sup>2</sup> ) .....	105
Tabelle 21:	Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 kWh Strom aus PV-Freifläche.....	109
Tabelle 22:	Rohstoffbedarf in kg für eine Wärmepumpenanlage (10 kW) .....	113
Tabelle 23:	Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t Elektrolyse-Wasserstoff.....	116
Tabelle 24:	Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t PtG-Methan ..	121
Tabelle 25:	Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t PtL-Methanol .....	124
Tabelle 26:	Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t FT-Kraftstoff..	127
Tabelle 27:	Rohstoffbedarf in mg pro kWh Strom aus CSP über Solarturm .....	131
Tabelle 28:	Rohstoffbedarf in mg pro kWh Strom aus CSP über Parabolrinnen .....	131
Tabelle 29:	Rohstoffbedarf in g pro Wh Strom aus PEMFC .....	136
Tabelle 30:	Rohstoffbedarf in g pro Wh Strom aus SOFC .....	136
Tabelle 31:	Rohstoffbedarf in kg für eine Geothermieanlage .....	139
Tabelle 32:	Rohstoffbedarf in kg für die Herstellung einer Vanadium-RFB im GreenLate-Szenario für alle Jahre .....	141
Tabelle 33:	Rohstoffbedarf in g für die Bereitstellung von 1 t DAC-CO <sub>2</sub> ...	144
Tabelle 34:	Rohstoffbedarf in g für die Bereitstellung von 1 t Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen .....	147
Tabelle 35:	Vergleich der Kupferbedarfe für PV und WEA (H <sub>2</sub> -Szenario) mit anderen Prognosen/Studien .....	155
Tabelle 36:	Globale Produktionsmengen verschiedener Materialien im Jahr 2022 .....	160
Tabelle 37:	Vergleich der Rohstoffbedarfe weltweit für die Schlüsseltechnologien in URMOD-3R und nach Bottom-up-Ansatz in GreenSupreme 2050.....	164
Tabelle 38:	Klimakosten in Euro <sub>2020</sub> pro Tonne CO <sub>2</sub> e .....	168
Tabelle 39:	Erzeugter Strom mit onshore Windenergieanlagen, TWh/a..	190
Tabelle 40:	Erzeugter Strom mit offshore Windenergieanlagen, TWh/a .	191

Tabelle 41:	Anzahl zugebauter Einheiten Photovoltaik Dachanlagen im Stützjahr .....	191
Tabelle 42:	Erzeugter Strom mit Photovoltaik Freiflächenanlagen, TWh/a .....	192
Tabelle 43:	Anzahl zugebauter Wärmepumpen im Stützjahr .....	193
Tabelle 44:	Heimisch produzierter Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt, inklusive Exporte, t/a.....	193
Tabelle 45:	Heimisch produzierter Elektrolyse-Wasserstoff als Zwischenprodukt für PtX, t/a .....	194
Tabelle 46:	Heimische Produktion von PtG-Methan, inklusive Exporte, t/a .....	194
Tabelle 47:	Heimische Produktion von PtL-Methanol, inklusive Exporte, t/a .....	195
Tabelle 48:	Heimische Produktion von PtL-FT-Kraftstoff, inklusive Exporte, t/a .....	195
Tabelle 49:	Erzeugter Strom mit Solarturm-Kraftwerken, TWh/a .....	196
Tabelle 50:	Erzeugter Strom mit Parabolrinnen-Kraftwerken, TWh/a .....	196
Tabelle 51:	Erzeugter Strom mit PEMFC im Verkehr, TWh/a .....	197
Tabelle 52:	Stationär erzeugter Strom, jeweils zur Hälfte mit SOFC und PEMFC, TWh/a.....	197
Tabelle 53:	Anzahl zugebauter Geothermie-Anlagen im Stützjahr.....	198
Tabelle 54:	Anzahl zugebauter Energiespeichereinheiten im Stützjahr ...	198
Tabelle 55:	Bereitstellung von DAC-CO <sub>2</sub> für die PtX-Produktion, t/a .....	199
Tabelle 56:	Bereitstellung von aufbereitetem Meerwasser für die PtX- Produktion, t/a .....	199
Tabelle 57:	Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien in Kilotonnen .....	200
Tabelle 58:	Zusammenfassung der für REFINE angenommenen Sekundäranteile der untersuchten Metalle für alle Regionen, Jahre und Szenarien .....	201

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
<b>AEL</b>	alkalische Elektrolyse
<b>BIP</b>	Bruttoinlandsprodukt
<b>Bzw.</b>	beziehungsweise
<b>CCS</b>	CO <sub>2</sub> -Abscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Storage)
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	Kohlendioxidäquivalente
<b>COMEXT</b>	Datenbank des Statistische Amts der Europäischen Union für den internationalen Warenverkehr
<b>COMTRADE</b>	Globale Handelsdatenbank der Vereinten Nationen
<b>CSP</b>	Solarthermisches Kraftwerk (Concentrated Solar Power)
<b>DAC</b>	Gewinnung von CO <sub>2</sub> aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture)
<b>DE</b>	Deutschland
<b>Destatis</b>	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>EoL</b>	End-of-life – Lebenswende (Produkte am Ende der Lebensdauer)
<b>et al.</b>	et alteri - und die jeweils anderen
<b>EUROSTAT</b>	Statistisches Amt der Europäischen Union
<b>EU ohne DE</b>	EU ohne Deutschland (URMOD-3R bezieht sich auf die EU28 einschließlich Großbritannien.)
<b>FT</b>	Fischer-Tropsch-Synthese (Verfahren zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen)
<b>GHD</b>	Gewerbe Handel Dienstleistungen
<b>ggü.</b>	gegenüber
<b>GreenLate</b>	Szenario mit einer späten Transformation zur Treibhausgasneutralität (Germany – Resource efficient and greenhouse gas neutral – Late Transition)
<b>GreenSupreme</b>	Szenario mit einer ambitionierten Transformation (Germany – Resource efficient and greenhouse gas neutral – Minimierung von Treibhausgas-Emissionen und Rohstoffbedarf im Betrachtungszeitraum)
<b>Gt</b>	Gigatonne
<b>GW</b>	Gigawatt (1 Million Kilowatt)
<b>GWP</b>	Gigawatt Peak („Spitzenleistung“ bei Solarzellen)
<b>GWP</b>	Global Warming Potential – Klimawandel
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>H<sub>2</sub>-Szenario</b>	Wasserstoffszenario der Langfristszenarien

Abkürzung	Erläuterung
<b>HTF</b>	Wärmeübertragungsflüssigkeit (Heat Transfer Fluid)
<b>IEA</b>	Internationale Energieagentur (International Energy Agency)
<b>IOT</b>	Input-Output-Tabelle
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>kWh</b>	Kilowattstunde (1000 Wattstunden)
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment – Ökobilanz
<b>LIV</b>	Letzte inländische Verwendung
<b>MENA</b>	Nahost und Nordafrika (Middle East and North Africa)
<b>Mio.</b>	Million
<b>Mrd.</b>	Milliarde
<b>MRIO</b>	Multi-regional Input Output
<b>MTO</b>	Methanol-to-Olefine-Route
<b>MW</b>	Megawatt (1000 Kilowatt)
<b>ÖPNV</b>	Öffentlicher Personennahverkehr
<b>PEMFC</b>	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle
<b>PET</b>	Polyethylenterephthalat
<b>PM<sub>2,5</sub></b>	Particulate Matter – Feinstpartikel mit aerodynamischem Durchmesser kleiner als 2,5 µm
<b>PtG</b>	Power to Gas – Strom zu Gas
<b>PtL</b>	Power to Liquid – Strom zu Flüssigkeit
<b>PtX</b>	Power to X – Strom zu X
<b>PtG</b>	Power-to-Gas, auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige Kraftstoffe wie Wasserstoff oder Methan
<b>PV</b>	Photovoltaik
<b>RC</b>	Recycling
<b>RESCUE</b>	Forschungsprojekt: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität
<b>REFINE</b>	Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland
<b>RFB</b>	Redox-Flow-Batterie/Flussbatterie
<b>RIR</b>	Rezyklateinsatzquote (Recycling-Input-Rate)
<b>RME</b>	Rohstoffäquivalente (Raw Material Equivalents)
<b>RMC</b>	Kumulierter Rohstoffkonsum der letzten inländischen Verwendung (Raw Material Consumption)

Abkürzung	Erläuterung
<b>RoE</b>	EU ohne Deutschland (URMOD-3R bezieht sich auf die EU28 einschließlich Großbritannien.)
<b>RoW</b>	Welt ohne EU (URMOD-3R bezieht sich auf die EU28 einschließlich Großbritannien.)
<b>SNG</b>	Synthetisch hergestelltes Methan (Synthetic Natural Gas)
<b>SOFC</b>	Festoxid-Brennstoffzelle
<b>ST</b>	Schlüsseltechnologien für die Energiewende
<b>THG</b>	Treibhausgase
<b>TN-H<sub>2</sub>-G</b>	Wasserstoffszenario der Langfristszenarien
<b>TWh</b>	Terrawattstunde (1 Milliarde Kilowattstunden)
<b>TOE</b>	Tonne Öläquivalent (Energieeinheit)
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt, Dessau
<b>UN</b>	United Nations
<b>URMOD</b>	Umweltökonomisches Treibhausgas- und Rohstoffmodell
<b>URMOD-3R</b>	Multiregionales umweltökonomisches Rohstoffmodell (mit den drei Regionen Deutschland, EU ohne DE und Welt ohne EU)
<b>VbH</b>	Vollbelastungsstunden
<b>WEA</b>	Windenergieanlagen
<b>Welt ohne EU (RoW)</b>	Welt ohne Europa (in Grafiken auch RoW, Rest of World) et al
<b>WP</b>	Wärmepumpe

## Zusammenfassung

Zentraler Bestandteil der Transformation zu einer klimaneutralen und ressourcenschonenden Gesellschaft ist die Defossilisierung der Energiesysteme für alle Verbrauchssektoren. Ein Großteil der fossilen Brennstoffe wird – wo technisch sinnvoll – durch regenerativen Strom ersetzt. Auch die stoffliche Nutzung von fossilen Rohstoffen wird weitestgehend durch erneuerbare, strombasierte Energieträger ersetzt. Gleichzeitig ist ein erheblicher Um- und Ausbau der Infrastruktur sowie ein Neubau von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen notwendig, um die benötigten Mengen erneuerbaren Stroms bereitzustellen. Für die Errichtung dieser Anlagen werden nicht nur viele Rohstoffe benötigt und Emissionen bei der Herstellung verursacht, sondern auch der Betrieb kann Auswirkungen auf die Umwelt haben. Die Frage nach Art und Höhe möglicher Nebenwirkungen dieser Energiewende im weiteren Sinne werden in diesem Vorhaben adressiert:

- ▶ Wie ändert sich der Rohstoffbedarf Deutschlands für relevante Rohstoffe? Stehen die benötigten Rohstoffe in ausreichender Menge zur richtigen Zeit zur Verfügung?
- ▶ In welchem Verhältnis stehen die national eingesparten zu den durch die unterstellte Energiewende bedingten nationalen und internationalen Treibhausgas(THG)-Emissionen?
- ▶ Welche weiteren Umweltwirkungen im Ausland lösen wir durch die unterstellte Energiewende eventuell aus (inkl. Vorketten)?
- ▶ Lassen sich die Umweltwirkungen und Rohstoffbedarfe einer Übertragung der deutschen Energiewende auf andere Länder oder einer globalen Energiewende abschätzen?

Um die Forschungsfragen in REFINE zu untersuchen, wurden zwei verschiedene methodische Ansätze angewendet und weiterentwickelt. Zur Untersuchung der Fragestellungen zu Umweltwirkungen, Rohstoff- bzw. Materialbedarfen für die Energiewende wurden die Ökobilanzmethode und Ökobilanzdatensätze verwendet (Bottom-up). Zur Abschätzung des gesamtökonomischen Ressourcenbedarfs (Top-down) wurde das umweltökonomische Modell URMOD, das auch in RESCUE genutzt wurde, weiterentwickelt.

Der hier vorliegende Teilbericht Rohstoffe dokumentiert die Arbeiten und Ergebnisse zum Rohstoffbedarf aus der gesamtwirtschaftlichen Perspektive und in Bezug auf ausgewählte Schlüsseltechnologien<sup>1</sup>. Auch beschreibt der Bericht die Methodik und den Aufbau des umweltökonomischen Modells URMOD und die Übertragung der Szenario-Annahmen in das Modell. Es wird eine Abschätzung vorgenommen, inwiefern die entstehenden Rohstoffbedarfe durch die bisherigen Fördermengen gedeckt werden können. Die Ergebnisse zu den Umweltwirkungen durch die Energiewende sowie das methodische Vorgehen zur Anpassung der ecoinvent Datenbank sind in einem eigenen Teilbericht veröffentlicht (Dittrich et al. 2024b). „Steckbriefe für Schlüsseltechnologien“ sind als Anhangband veröffentlicht (Dittrich et al. 2024c).

### Die Szenarien

Im Rahmen von drei Szenarien werden unterschiedliche Transformationspfade aufgezeigt. Zum einen wurden die Szenarien GreenSupreme (Dittrich et al. 2020c) und GreenLate (Dittrich et al. 2020d) aus dem RESCUE-Projekt ausgewählt. Vor dem Hintergrund der aktuellen politischen

---

<sup>1</sup> Folgende Schlüsseltechnologien sind Gegenstand der Untersuchung: Windenergieanlagen, onshore und offshore, Photovoltaik, Dachanlagen und Freiflächenanlagen, Wärmepumpen, Elektrolyse, Methanisierung, Methanolsynthese, FT-Synthese, Solarthermische Kraftwerke (Solarturm und Parabolrinne), Brennstoffzellen, Geothermie, Energiespeicher, CO2-Bereitstellung und Meerwasserentsalzungsanlagen.

Entwicklungen zur Verschärfung der Treibhausgasminderungen und zur Entwicklung von grünem Wasserstoff wurde als weiteres Szenario das Wasserstoffszenario aus den BMWI-Langfristszenarien (Sensfuß et al. 2021) für Deutschland berücksichtigt.

Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Transformationsgeschwindigkeit, der Struktur der eingesetzten Technologien und in Annahmen zu gesellschaftlichen Veränderungen. Die Szenarien entsprechen zwar nicht mehr dem aktuellen politischen Ziel des deutschen Klimaschutzgesetzes, bis 2045 treibhausgasneutral zu werden (KSG 2021)<sup>2</sup>, aber die Erkenntnisse aus den unterschiedlichen Szenarien können grundsätzlich auch auf aktuelle Transformationspfade übertragen werden.

Das Szenario **GreenSupreme** beschreibt eine schnelle und tiefgreifende Transformation des Energiesystems, mit der 2050 eine vollständige Treibhausgasneutralität erreicht werden kann. Es findet ein zügiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe statt. Optionen zur Erschließung von Energieeinsparungen werden erschlossen, sodass der Endenergiebedarf über alle Anwendungsbereiche in 2050 gegenüber 2020 annähernd halbiert ist. Neue strombasierte Energieträger (Power to X, PtX-Technologien) substituieren fossile Rohstoffe in der Chemie- und Metallindustrie. Darüber hinaus werden sie in Bereichen eingesetzt, in denen eine Umstellung auf die direkte Stromnutzung schwer möglich ist, z. B. im Flugverkehr oder für bestimmte Nutzfahrzeuge. In GreenSupreme steigt die Materialeffizienz in allen Sektoren stark an. Es werden weitgehende Veränderungen im Verhalten angenommen, beispielsweise bei den Ernährungsgewohnheiten, der Mobilität, den Wohnansprüchen und im allgemeinen Konsumverhalten. Die Bevölkerungszahl in Deutschland sinkt, das Wirtschaftswachstum geht bis 2030 auf Null zurück, aber das Einkommen pro Person steigt an.

Das Szenario **GreenLate** beschreibt eine langsamere Transformation des Energiesystems, mit der eine Treibhausgasneutralität in 2050 knapp erreicht werden kann. Maßnahmen und Investitionen werden erst ab 2040 in größerem Umfang realisiert. Die Energieversorgung beruht auch hier im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien. Energieeffizienzpotenziale werden nur teilweise gehoben; der Endenergiebedarf ist in 2050 um 20 % gegenüber 2020 reduziert. Hohe Durchdringungen direkt strombasierter und damit systemisch effizienter Techniken können bis 2050 nur in Anwendungsbereichen mit kurzen Erneuerungszyklen und in Bereichen mit hohen Investitionsanreizen realisiert werden. Rohstoffeffizienz- und Recyclingpotenziale werden nur zum Teil ausgeschöpft. In GreenLate ist der Gebäudebestand weniger modernisiert und saniert im Vergleich zu GreenSupreme. Auch wenn die Elektromobilität den Individualverkehr dominiert, ist der Schwerlastverkehr 2050 weiterhin von Verbrennungskraftmaschinen geprägt. Dies führt zu hohen Bedarfen an PtX-Kraftstoffen, die importiert werden.

Das **H<sub>2</sub>-Szenario** (TN-H<sub>2</sub>-G) aus der Familie der Langfristszenarien (Sensfuß et al. 2021) setzt auf eine sehr starke Nutzung von Wasserstoff im Energiesystem. Die Nachfrage nach Wasserstoff wird durch Elektrolyse gedeckt. Im Jahr 2050 werden etwa 23 % der benötigten Menge in Deutschland erzeugt und die restlichen Anteile aus europäischen Nachbarländern importiert. Die Wertschöpfung des Industriesektors wächst bis zum Jahr 2050 um etwa 1 % pro Jahr. Es werden Fortschritte bei effizienter Materialverwendung entlang der Wertschöpfungsketten bis hinein in die Endverbrauchssektoren wie die Bauwirtschaft angenommen. Auch bei der Kreislaufwirtschaft werden in allen Szenarien substanzielle Fortschritte beim Einsatz von Sekundärprodukten, etwa in der Stahl- oder Kunststoffproduktion, angesetzt. Der Endenergiebedarf in 2050 liegt 24 % niedriger als 2020.

---

<sup>2</sup> Alle drei Szenarien erreichen Treibhausgasneutralität in 2050 (Reduktion der Treibhausgasemissionen von mind. 95 % gegenüber 1990).

Die RESCU-E-Szenarien und das Langfristszenario wurden für Deutschland bzw. Europa formuliert und modelliert. Um einerseits Importe abzudecken und andererseits eine Übertragung der Energiewende zu betrachten, wurde für die Transformation in Europa ohne Deutschland und für den Rest der Welt auf bestehende 1,5 °C- und 2 °C- Transformationsszenarien zurückgegriffen (Teske et al. 2019).

### **Der gesamtökonomische Rohstoffbedarf (URMOD-3R)**

Für die Ermittlung des Rohstoffkonsums (raw material consumption, RMC) kommt das multiregionale umweltökonomische Ressourcenmodell URMOD-3R zum Einsatz. URMOD-3R hat das Ziel, den Einsatz von Primär- und Sekundärrohstoffen, sowie primäre- und sekundäre erneuerbare Energien auf gesamtwirtschaftlicher Ebene lückenlos abzubilden. Die Weiterentwicklung des Modells ermöglicht es, den Rohstoffkonsum auf gesamtwirtschaftlicher Ebene für die drei Regionen Deutschland, EU ohne Deutschland und Welt ohne EU, die ausgewählten Szenarien und Stützjahre (2030, 2040 und 2050) zu ermitteln. Ebenso ist eine gezielte Ausweitung der Input-Output-Tabellen (IOT) für die im Projekt vertieft untersuchten Schlüsseltechnologien sowie für bestimmte Rohstoffe und ausgewählte Industriebranchen möglich.

Bei URMOD-3R handelt es sich um ein multiregionales Input-Output Model, dessen wichtigste Elemente die Güterverflechtungsmatrix, die Matrix der letzten inländischen Verwendung (LIV) und die Ressourcenmatrix sind. Die Güterverflechtungsmatrix bildet lückenlos die weltweiten Verflechtungen der Produktionsaktivitäten in Form von Gütertransaktionen zwischen den Sektoren ab (sog. Vorleistungen). Die LIV stellt die Endnachfrage nach Konsum- und Investitionsgütern dar, gegliedert nach Endnachfragekategorien, Gütergruppen und Regionen. Die Ressourcenmatrix beinhaltet den primären und sekundären Ressourceninput in die einzelnen Regionen. Daraus lässt sich der kumulierte (direkte und indirekte) Ressourcenaufwand der inländischen Nachfrage einer Volkswirtschaft berechnen und einzelne Ressourcenaufwendungen können spezifischen Endnachfrageaktivitäten zugeordnet werden.

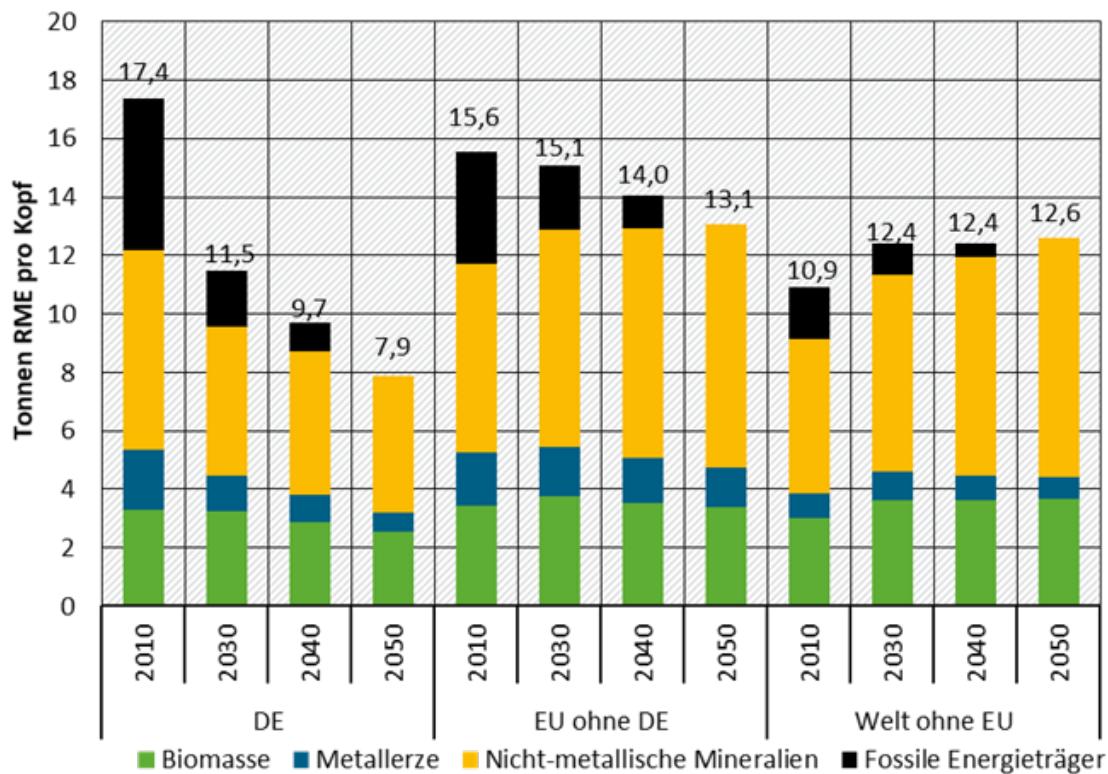
Die dargestellten Ergebnisse dieses Top-down Ansatzes beziehen sich ausschließlich auf das GreenSupreme-Szenario. Im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien handelt es sich dabei um das Szenario mit dem ambitioniertesten Transformationspfad und dem geringsten Rohstoffbedarf. Abbildung Z- 1 zeigt die Entwicklung des Rohstoffkonsums (RMC) pro Kopf (auch „Rohstoff-Fußabdruck“) von 2010 bis 2050 in den Regionen Deutschland (DE), EU ohne DE und Welt ohne EU. Wie zu erkennen ist, führt die unterstellte globale Energiewende dazu, dass in allen drei Regionen bis 2050 keine fossilen Energieträger mehr genutzt werden.

Abbildung Z- 1 illustriert dabei, wie mit einer ambitionierten Transformation in Deutschland der Rohstoff-Fußabdruck von vergleichsweise hohen 17,4 t Rohstoffäquivalenten (raw material equivalents, RME) bis 2050 auf bis zu 7,9 t RME pro Kopf reduziert wird. Dies entspricht einer Reduktion von 55 % gegenüber dem Niveau von 2010, womit Deutschland in 2050 deutlich unter dem weltweiten Durchschnitt des Jahres 2010 von 11,29 t RME pro Kopf liegt. In der EU ohne DE sinkt der RMC pro Kopf im selben Zeitraum geringer, um ca. 17 %, während der RMC pro Kopf in der Welt ohne EU um 15 % ansteigt. Dabei ist zu beachten, dass der Pro-Kopf-Bedarf an Rohstoffen in der Welt ohne EU in 2010 im Vergleich zu Deutschland und der EU ohne DE auf einem deutlich niedrigeren Ausgangsniveau liegt und auch in 2050 noch nicht den Bedarf der EU ohne DE erreicht.

Die unterschiedlichen Entwicklungen der Rohstoffbedarfe lassen sich hauptsächlich durch unterschiedliche Annahmen zum wirtschaftlichen Wachstum in den jeweiligen Regionen erklären: Während das Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf in Deutschland zwischen 2010 und

2050 um ca. 26 % wächst, verdoppelt es sich in der EU ohne DE fast (95 % Wachstum) und steigt in der Welt ohne EU um knapp den Faktor 2,5 (142 % Wachstum).

**Abbildung Z- 1: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf nach Jahren im Szenario GreenSupreme**

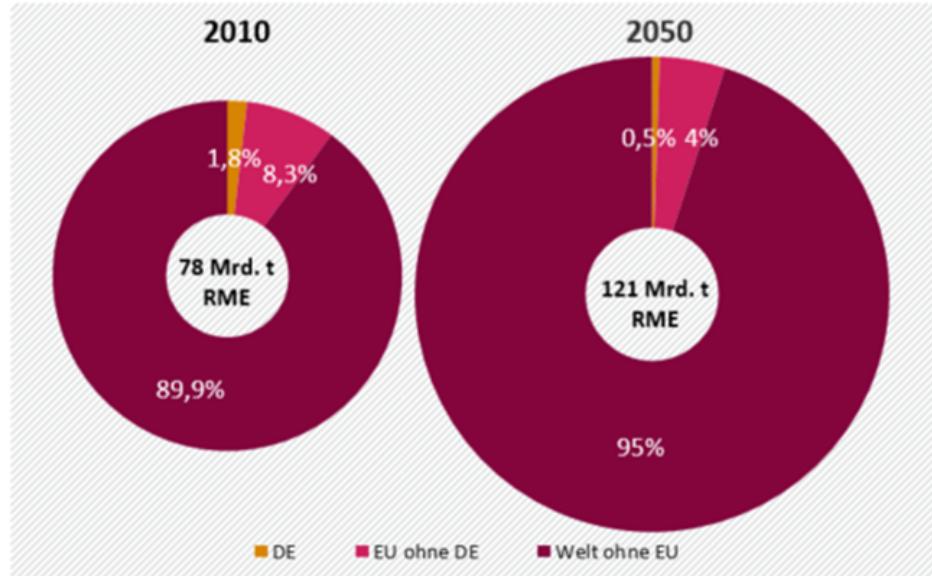


Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Abbildung Z- 2 zeigt den globalen Primärrohstoffkonsum in 2010 und 2050. Insgesamt steigt der Primärrohstoffbedarf zwischen 2010 und 2050 von 78 Mrd. t RME auf 121 Mrd. t RME an. Dies ist auf den prognostizierten Anstieg der Bevölkerung von 6,4 Mrd. in 2010 auf 9,2 Mrd. Menschen in 2050 in der Region Welt ohne EU und das gleichzeitige Ansteigen des RMC Pro-Kopf in dieser Region (s. o.) zurückzuführen. In den Regionen Deutschland und EU ohne DE ist die Bevölkerungsentwicklung dagegen im gleichen Zeitraum leicht rückläufig. An der Entwicklung des Primärrohstoffkonsums in den drei Regionen zeigt sich, dass die angenommenen, deutlich gestiegenen Recyclingquoten und Verbesserungen von Materialeffizienzen im Vergleich zur wirtschaftlichen Entwicklung einen untergeordneten Einfluss haben und Aufholeffekte und Bevölkerungswachstum in der Welt ohne EU den globalen Primärrohstoffkonsum prägen.

In Abbildung Z- 2 ist zusätzlich der Anteil aller Regionen am globalen Bedarf von Primärrohstoffen abzulesen: Während Deutschland in 2010 im Vergleich zu seinem Anteil an der globalen Bevölkerung (1,17 %) einen überproportional hohen Konsum aufweist, liegt der Anteil des Primärrohstoffkonsums in 2050 im Szenario GreenSupreme mit 0,5 % unter dem Anteil an der Weltbevölkerung (0,82 %).

**Abbildung Z- 2: Primärrohstoffkonsum (RMC) 2010 und 2050 der drei Regionen in GreenSupreme**

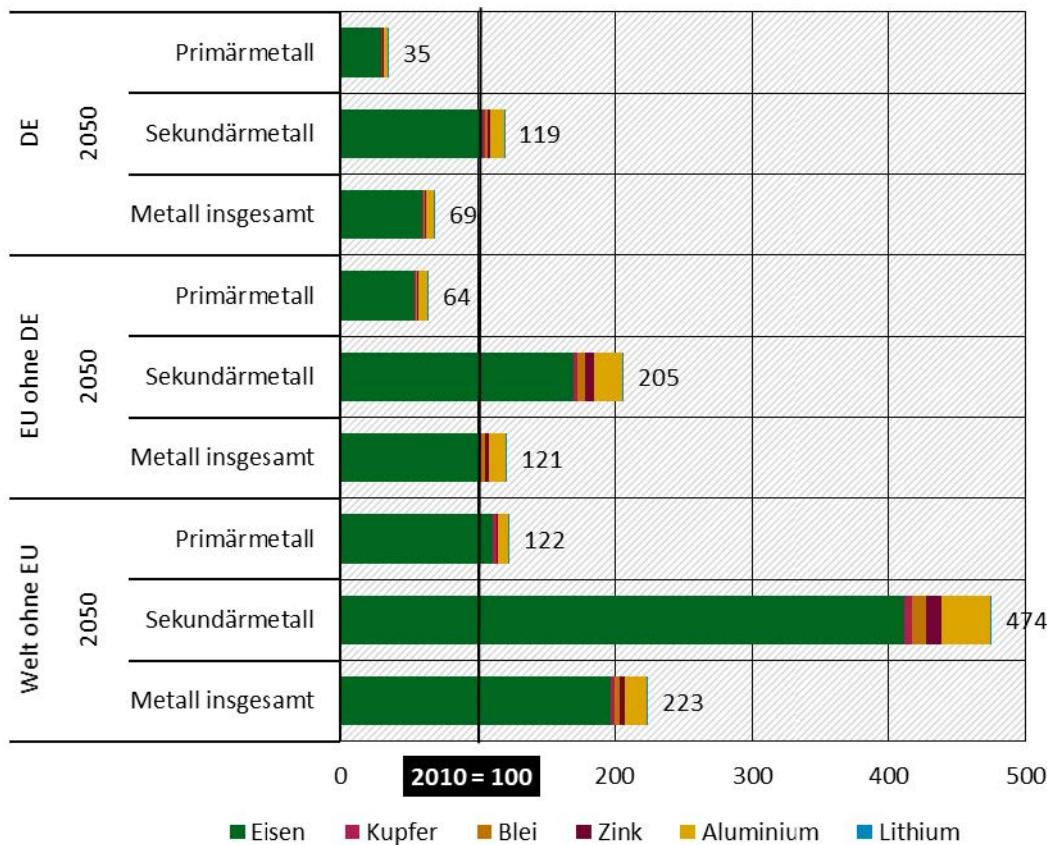


Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Mit Blick auf die Schlüsseltechnologien der Energiewende sind vor allem Metalle als Rohstoff von besonderer Bedeutung (siehe Abbildung Z- 3). Der Bedarf an Primärmetallen entwickelt sich in den Regionen bis 2050 unterschiedlich: Für Deutschland verringert sich der Bedarf um 31 %, in der EU ohne DE ergibt sich eine Zunahme von 21 % und für die Welt ohne EU von 153 %. In allen Regionen ist eine deutliche Steigerung des Einsatzes von Sekundärmetallen zu erkennen, weshalb der Bedarf an Primärmetallen für Deutschland und die EU ohne DE sinkt (-65 % bzw. -36 %) während er in der Welt ohne EU in deutlich geringerem Ausmaß steigt als die Nachfrage nach Metall gesamt (+22 %).

Die Differenzierung nach Primär- und Sekundärmetallen zeigt deutlich unterschiedliche Entwicklungen. Die Nutzung von Primärmetallen insgesamt vermindert sich für DE um 65 % (EU ohne DE -36 % und Welt ohne EU +22 %). Im Vergleich dazu erhöht sich der kumulierte Gehalt der Güter der letzten inländischen Verwendung an Sekundärmetallen durchgehend: Deutschland +19 %, EU ohne DE +105 % und Welt ohne EU +374 %. Aufgrund steigender Recyclingraten kommt es zu beträchtlichen Einsparungen von metallischen Primärrohstoffen.

**Abbildung Z- 3: Veränderung des Einsatzes ausgewählter Primär- und Sekundärmetalle (Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium) 2050 ggü. 2010 in GreenSupreme**



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

In allen drei Regionen steigt der Anteil der rohstoffintensiven Bauinvestitionen deutlich an, worunter auch Investitionen in die Schlüsseltechnologien der Energiewende fallen. Diese steigen zwar in allen Regionen stark an, machen insgesamt allerdings nur einen überschaubaren Teil des gesamten Primärrohstoffkonsums aus (je nach Region 1,3 – 1,6 %). Zu beachten ist allerdings, dass der Rohstoffaufwand der Schlüsseltechnologien zu 80 % aus Metallen besteht und sich damit stark von der Zusammensetzung der restlichen Bauinvestitionen abhebt (ca. 6 % Metallgehalt). Insgesamt machen Investitionen in Schlüsseltechnologien ca. 12,8 % der globalen Nachfrage nach Metallerzen in 2050 aus.

Eine Übertragung dieser Modellergebnisse auf die Realität lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien, in Hinblick auf dessen verhältnismäßig geringen Gesamtrohstoffbedarf, der Umsetzung einer ambitionierten Energiewende prinzipiell nicht im Wege steht. Allerdings kann der hohe Bedarf an einzelnen Metallen zu Konflikten mit anderen metallnachfragenden Sektoren führen, falls die Fördermengen nicht entsprechend angepasst werden können. Die (nachfolgenden) Bottom-up Analysen, kommen zum gleichen Ergebnis.

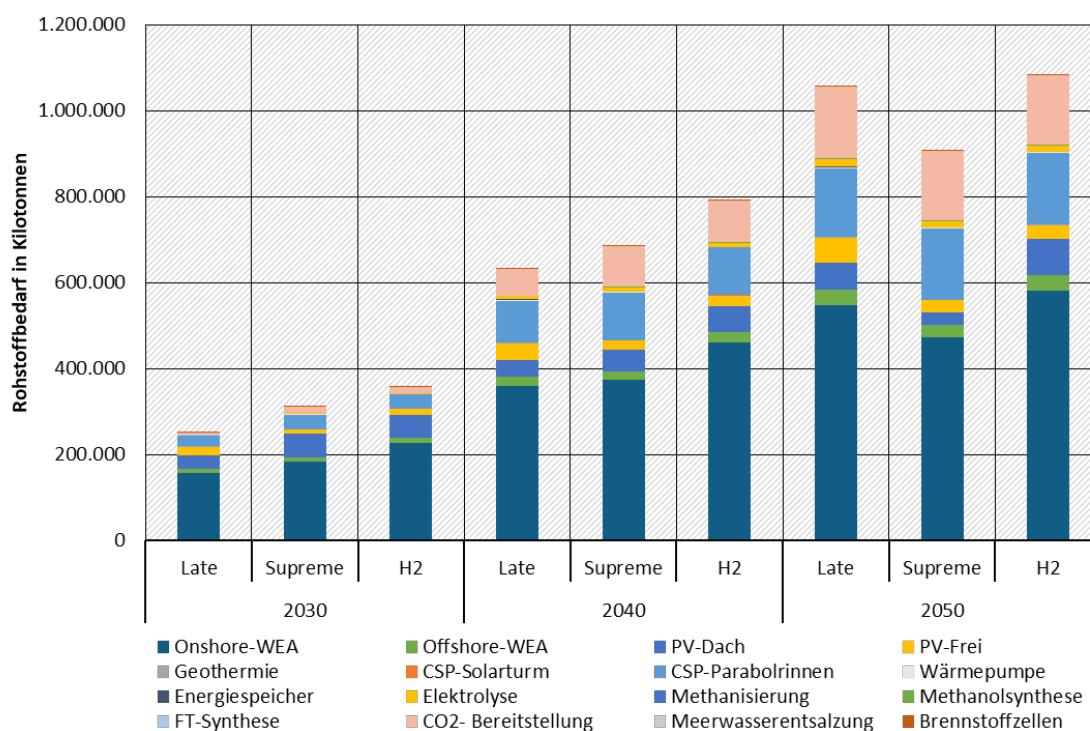
#### **Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien auf Basis angepasster ecoinvent Datensätze (Bottom-up)**

Im Projekt wurde neben den URMOD-3R (Top-down) Auswertungen, ein zweiter, nach bottom-up Prinzip gerechneter Ansatz für die Herleitung der Rohstoffbedarfe der Schlüsseltechnologien verfolgt. Hierfür wurden ecoinvent Datensätze auf Basis des angepassten Ökobilanzmodells von (Liebich et al. 2023) bereitgestellt und ausgewertet.

Die Berechnungen mit den angepassten Datenbanken des Ökobilanzmodells liefern spezifische Ergebnisse je Einheit Produkt (Dienstleistung) für die drei Szenarien, für die Stützjahre 2030, 2040, 2050 und für die drei Regionen<sup>3</sup>. Bei diesen Berechnungen handelt es sich um eine andere Systemgrenze als beim Top-down-Ansatz mittels URDMOD-3R (Kapitel 4). Die Differenzierung nach (bis zu 15) Rohstoffkategorien erlaubt einen detaillierten Einblick in Materialbedarfe je Transformationspfad. Das Hauptaugenmerk der Auswertung liegt auf Primärmetallen, mineralischen Rohstoffen und Kunststoffen. Schrottmengen wurden für die Inanspruchnahmen nicht berücksichtigt<sup>4</sup>.

Die Ergebnisse (Abbildung Z- 4) zeigen, dass der Rohstoffaufwand, der mit dem Zubau der Schlüsseltechnologien weltweit einhergeht, konstant ansteigt. Im Jahr 2030 variiert der globale Rohstoffbedarf je nach Szenario noch zwischen 252 Mio. t und 358 Mio. t. Im Zieljahr 2050 wird eine Spanne von 907 Mio. t und 1.084 Mio. t erreicht. Das GreenSupreme-Szenario präsentiert sich in diesem Jahr als der Transformationspfad mit dem geringsten Rohstoffbedarf.

**Abbildung Z- 4: Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Im Zeitverlauf ist eine Variation der Rohstoffbedarfe in den Szenarien zu beobachten. Im ersten Stützjahr, 2030, fällt global zunächst im GreenLate-Szenario der Bedarf am geringsten aus (252 Mio. t), was sich mit dem vergleichsweise geringeren Ambitionsgrad im Hinblick auf eine schnelle Umsetzung der Transformation erklären lässt. In 2030 und 2040 liegt der Bedarf im H<sub>2</sub>-Szenario am höchsten (358 Mio. t bzw. 791 Mio. t). In 2040 nähert sich der Bedarf im GreenLate-Szenario (633 Mio. t) deutlicher an den Bedarf des GreenSupreme-Szenarios (687 Mio. t) an. Im Zieljahr 2050 fällt wiederum der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario mit 1.084 Mio. t am höchsten aus. Nur minimal darunter liegt das GreenLate-Szenario (1.058 Mio. t), bedingt durch die Notwendigkeit die langsame Transformation aufzuholen und da bereits ein

<sup>3</sup> Deutschland (DE), Europa ohne Deutschland (EU ohne DE, bzw. RoE) und Welt ohne Europa (Welt ohne EU, bzw. RoW)

<sup>4</sup> Der Aspekt Recycling ist über die neu ermittelten Sekundäranteile und die Sensitivität hierzu adressiert (vgl. Kap. 4.2.2.3 und Kap. 4.2.2.4).

Großteil der Anlagen ersetzt werden muss. Die schnelle Umsetzung im GreenSupreme-Szenario spiegelt sich im geringsten Bedarf im Jahr 2050 wieder (907 Mio. t).

Deutschland kommt ein Anteil von 1-2 % des globalen Rohstoffbedarfs für Schlüsseltechnologien zu; EU ohne DE beansprucht 4-9 % des Bedarfs und der Welt ohne EU kommt ein Anteil von 89-94 % zu, je nach Szenario und Jahr.

Fünf Schlüsseltechnologien dominieren den Rohstoffbedarf. Den größten Anteil nehmen die Onshore-Windenergieanlagen ein (52-63% je nach Szenario und Jahr), gefolgt von der solarthermischen Kraftwerkstechnologie der Parabolrinnen (9-18 %), PV-Dachanlagen (3-17 %), der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung (3-18 %), PV-Freilandanlagen (3-8 %) und Offshore-Windenergieanlagen (3-4 %). Alle weiteren Schlüsseltechnologien haben einen Anteil von 2 % oder geringer.

Der Blick auf Rohstoffe über alle Technologien (und Regionen, Szenarien und Jahre) hinweg zeigt eine Dominanz der nicht-metallischen Rohstoffbedarfe von Sand und Kies (33-43 %), sowie Zement und Beton (24-32 %). Bei den Metallen dominiert der Eisen- und Stahlbedarf (14-17 %), gefolgt von Aluminium (3-6 %) und Kupfer (rund 1 %).

Für die vier PtX-Energieträger – Wasserstoff, PtG-Methan, PtL-Methanol und Fischer-Tropsch-(FT-) Kraftstoffe – sind sowohl Deutschland als auch die EU ohne DE auf Importe (weitestgehend) aus der Welt ohne EU angewiesen, um den Bedarf zu decken. Wasserstoff wird dabei ausschließlich im H<sub>2</sub>-Szenario von Deutschland (zusätzlich) direkt importiert. Abgesehen davon, wird es als Zwischenprodukt für daraus hergestellte importierte PtX-Produkte (PtL, PtG, FT) benötigt. Im GreenLate-Szenario fallen die Rohstoffaufwendungen dafür für Deutschland besonders deutlich aus. Im Jahr 2050 werden etwa 612 kt Rohstoffe für die H<sub>2</sub>-Bereitstellung als Zwischenprodukt benötigt, die durch den deutschen PtX-Import in der Welt ohne EU anfallen. Für die PtL-Methanolsynthese sind es 61 kt Rohstoffe, 40 kt Rohstoffe für FT-Kraftstoffe sowie 41 kt Rohstoffe für PtG-Methan. In der EU ohne Deutschland fallen die Rohstoffaufwendungen für PtX-Importe ebenfalls im Jahr 2050 am höchsten aus; für das GreenLate-Szenario werden etwa 661 kt für die H<sub>2</sub>-Bereitstellung als Zwischenprodukt, 132 kt Rohstoffe für die PtL-Methanolsynthese sowie weitere 22 kt Rohstoffaufwendungen für FT-Kraftstoffe in der Welt ohne EU benötigt, um die entsprechende Nachfrage in der EU ohne Deutschland zu decken.

In Relation zu heutigen Produktionsmengen (2022) übersteigt keiner der ermittelten und ausgewerteten Rohstoffbedarfe für (ausschließlich) Schlüsseltechnologien derzeitige Produktionsniveaus. Allerdings schließt diese Betrachtung Bedarfe anderer Produktionsbereiche nicht ein. Dennoch nimmt insbesondere Aluminium einen bemerkenswerten Anteil von 60 % im H<sub>2</sub>-Szenario und 63 % im GreenLate-Szenario ein; Kupfer und sonstige Metalle nehmen einen Anteil von 26 % bzw. 46 % im Jahr 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario ein. Eisen und Stahl variieren je nach Jahr und Szenario zwischen 2-10 %. Kunststoffe nehmen zwischen 1-4 % und Sande und Kies zwischen 1-2 % aktueller Produktionsmengen ein. Diese Anteile zeigen insbesondere für Kupfer und Aluminium, dass es hier zu Konflikten mit anderen Rohstoffnachfragen anderer Sektoren kommen kann und eine Steigerung der Fördermengen relevant wird. Vor diesem Hintergrund und den damit möglicherweise steigenden Umweltbelastungen nimmt die Dringlichkeit zur Umsetzung weiterer Rohstoffeinsparungen weiter zu.

### **Umweltkosten der Transformationspfade**

An die im Projekt abgeleiteten Rohstoffbedarfe schließt sich die Frage an, welche Folgen ein „Mehr“ oder „Weniger“ dieser Bedarfe in den unterschiedlichen Pfaden hat. Jede Rohstoffentnahme führt zu Umweltbelastungen und monetären Schäden und damit zu Kosten für die heutige und auch zukünftige Gesellschaft und deren Wohlfahrt. Vor diesem Hintergrund wurden ausgewählte Umweltkosten der verschiedenen Transformationspfade ermittelt. Als methodische Datengrundlage wurden die Empfehlungen des Umweltbundesamts zu Umweltkostensätzen (Matthey und Bünger 2020) genutzt.

Gegenwärtig belaufen sich die Umweltkosten durch Treibhausgas(THG-)Emissionen, die durch den Endenergiebedarf Deutschlands im Jahr 2020 verursacht werden auf 150 Mrd. €, wenn die Wohlfahrt heutiger Generationen höher gewichtet wird. Wird eine intergenerationale Gerechtigkeit vorausgesetzt und daher die Wohlfahrt zukünftiger Generationen gleich wie die der heutigen Generationen bewertet, dann belaufen sich die aktuellen Umweltkosten durch THG-Emissionen auf 530 Mrd. €.

Die Entwicklung der Umweltkosten über die Stützjahre zeigt deutlich den monetären Nutzen eines ambitionierten Transformationspfades gegenüber einer zögerlichen Entwicklung. Im ambitionierten GreenSupreme-Szenario werden durch die zügige Verminderung der THG-Emissionen bereits in 2030 Kosten in Höhe von 64 Mrd. € vermieden und damit eine Verminderung um 40 % gegenüber 2020 erzielt. Im H<sub>2</sub>- und im GreenLate-Szenario liegt die Vermeidung dagegen nur bei 48 Mrd. € bzw. 26 Mrd. €.

Durch den deutschen Energiebedarf entstehen nicht nur in Deutschland selbst, sondern in großem Maße auch im Ausland Umweltwirkungen. Die Quantifizierung der Kosten, etwa in Form von Gesundheitsschäden durch die Feinstaubbelastung, verdeutlicht, welche Verantwortung Deutschland gegenüber Gesellschaften außerhalb der eigenen Landesgrenze hat und welche gesellschaftlichen Folgen bzw. Kosten durch unterschiedliche Transformationspfade außerhalb der innerdeutschen Grenze ausgelöst werden. Zudem liefert der hohe monetäre Nutzen einer ambitionierten Umweltpolitik für die Gesellschaft ein wichtiges Argument für umfangreiche Investitionen in diese. Dieser Nutzen liegt bei Gleichgewichtung der Wohlfahrten heutiger und zukünftiger Generationen noch deutlich höher.

### **Fazit und Forschungsbedarf**

Die Forschungsarbeiten im Projekt REFINE erlauben eine umfassende Einschätzung des Rohstoffbedarfs für eine ambitionierte Transformation, sowohl in Deutschland als auch in den beiden anderen Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU. In diesem Teilbericht wurde mit URMOD-3R eine gesamtwirtschaftliche Abschätzung des Rohstoffkonsums (RMC) vorgenommen. Der Rohstoffbedarf isoliert für die Schlüsseltechnologien wurde mit einer materialbezogenen Auswertung der angepassten ecoinvent-Datensätzen abgeschätzt. Folgende zentrale Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- ▶ Mit der ambitionierten Transformation im Szenario GreenSupreme kann in Deutschland der Primärrohstoffkonsum bis 2050 um 55 % auf 7,9 t RME pro Kopf reduziert werden. In der EU ohne DE geht der RMC pro Kopf langsamer zurück und liegt 2050 bei 13,1 t RME. In der Region Welt ohne EU besteht Aufholbedarf und der Primärrohstoffkonsum steigt auf 12,6 t RME pro Kopf bis 2050.
- ▶ Der deutsche Anteil am globalen Ressourcenbedarf ist in GreenSupreme im Jahr 2050 deutlich niedriger als der Anteil Deutschlands an der weltweiten Bevölkerung und an der Wirtschaftsleistung. Dies ist eine deutliche Umkehr zu den Verhältnissen im Jahr 2010, in welchem Deutschland einen überproportionalen Anteil am Rohstoffbedarf aufweist.

- ▶ In allen drei betrachteten Szenarien macht der Rohstoffaufwand für die Schlüsseltechnologien einen überschaubaren Anteil am Primärrohstoffkonsum aus und stellt damit kein Hindernis für eine ambitionierte und schnelle Umsetzung der Energiewende dar.
- ▶ Das ambitionierte GreenSupreme-Szenario ist das Szenario mit den niedrigsten Ressourcen- und Rohstoffaufwendungen und Umweltkosten in 2050. Insbesondere aus der Perspektive der Umweltkosten zeigt sich der gesellschaftliche Nutzen einer schnellen und umfassenden Transformation.

Es verbleiben eine Reihe von Aspekten, für die wir Forschungsbedarf und weitere Entwicklungsmöglichkeiten sehen. Aktuell bezieht sich das weiterentwickelte URMOD-3R Modell auf das Basisjahr 2010. Das Basisjahr sollte für zukünftige Nutzungen aktualisiert werden und Szenarien auch im Fünfabstand modelliert werden, damit auf neue politische Entwicklungen besser reagiert werden kann, wie beispielsweise auf die Änderung des Zieljahres für Treibhausgasneutralität in Deutschland auf 2045. Um die Komplexität zu verringern, könnte zudem die Gütergruppengliederung etwas reduziert werden. Der Nachweis erneuerbarer Energien und der Sekundärmetalleinsatz sollte beibehalten werden. Mit den jetzt durch REFINE gewonnenen Erkenntnissen könnte der gesonderte Nachweis von Schlüsseltechnologien und die damit einhergehende Gliederungstiefe bei den Investitionen wieder entfallen. Auch die Gliederungstiefe der letzten Inländischen Verwendung könnte reduziert werden.

Ein Abgleich der Ergebnisse zwischen den beiden Modellierungsansätzen URMOD-3R (Top-down) und prospektive Ökobilanzmethode (Bottom-up) war im Projekt REFINE nicht vorgesehen. Eine vergleichende Betrachtung der beiden Ansätze und eine Erörterung möglicher Synergien und Kombinationsmöglichkeiten sehen wir daher als wichtigen Ansatzpunkt für weitere Forschung.

Für die Rohstoffauswertungen zu den Schlüsseltechnologien mittels der angepassten ecoinvent Datensätze wurde im Projektverlauf ein neuer Lösungsansatz entwickelt, indem für Primär- und Sekundärmetalle neue Informationsflüsse im Ökobilanzmodell ergänzt wurden. Die dadurch mögliche direkte Auswertung kann effizienter und genauer erfolgen. Im Projekt konnte der Ansatz aufgrund der Beschränkung auf Metallrohstoffe noch nicht angewendet werden, gegebenenfalls ist aber auch eine Entwicklung für andere Rohstoffe und Materialgruppen möglich.

## Summary

The key element for the transformation to a climate-neutral and resource-efficient society is the defossilisation of energy systems for all consuming sectors. The majority of fossil fuels will be replaced – where technically feasible – by renewable electricity. The use of fossil fuels as feedstock materials will also be largely substituted by renewable, electricity-based energy carriers. At the same time, a considerable restructuring and expansion of the infrastructure as well as the construction of new wind energy and photovoltaic plants will be necessary to provide the required amounts of renewable electricity. Not only does the installation of these plants require a significant amount of raw materials and cause emissions during manufacturing, but their operation can also have an impact on the environment. The question of the type and extent of possible side effects of this energy transition in the broader sense are addressed in this project:

- ▶ How will Germany's raw material demand for relevant raw materials change? Are the required raw materials available in sufficient quantities at the right time?
- ▶ What is the relationship between the greenhouse gas emissions saved nationally and the emissions generated nationally and internationally as a result of the assumed energy transition?
- ▶ What other environmental impacts are likely to be triggered by the assumed energy transition, including the upstream process chains?
- ▶ Can the environmental impacts and raw material demand of a global energy transition be assessed?

To investigate the research questions in REFINE, two different methodological approaches were applied and further developed. The life cycle assessment (LCA) method and datasets were used to analyse the questions on environmental impacts and raw material and resource consumption for the energy transition (bottom-up). The environmental-economic model URMOD, which was also used in RESCUE, was further developed to estimate the overall raw material consumption (top-down).

This sub-report on raw materials documents the work and results on raw material demand from a macroeconomic perspective and in relation to selected key technologies. The report also describes the methodology and structure of the environmental-economic model URMOD and the transfer of the scenario assumptions into the model. An estimate is made of the extent to which the resulting raw material demand can be covered by the current extraction volumes. The results on the environmental impacts of the energy transition and the methodological procedure for adapting the ecoinvent database are published in a separate sub-report (Dittrich et al. 2024b). "Factsheets for key technologies" are published as an appendix (Dittrich et al. 2024c).

### The scenarios

Different transformation paths are shown in three scenarios. First, the GreenSupreme (Dittrich et al. 2020c) and GreenLate (Dittrich et al. 2020d) scenarios were selected from the RESCUE project. Against the backdrop of current political developments on tightening greenhouse gas reductions and the development of green hydrogen, the hydrogen scenario from the BMWI "Long-term scenarios" (Sensfuß et al. 2021) for Germany was chosen as a further scenario.

The scenarios differ in terms of the speed of transformation, the structure of the technologies used and assumptions regarding social changes. Although the scenarios no longer correspond to

the current political goal of the German Climate Protection Act to become greenhouse gas neutral by 2045 (Bundesministerium der Justiz 2021), the findings from the different scenarios can in principle also be applied to current transformation paths.

The **GreenSupreme scenario** describes a rapid and far-reaching transformation of the energy system that can achieve complete greenhouse gas neutrality by 2050. There is a rapid phase-out of the use of fossil fuels. Options for tapping into energy savings will be developed so that the final energy demand across all areas of application is almost halved in 2050 compared to 2020. New electricity-based energy sources (Power to X, PtX technologies) are replacing fossil fuels in the chemical and metal industries. They are also used in areas where it is difficult to switch to the direct use of electricity, e.g. in aviation or for certain commercial vehicles. In GreenSupreme, material efficiency increases sharply in all sectors. Far-reaching changes in behaviour are assumed, for example in eating habits, mobility, housing requirements and general consumer behaviour. The population in Germany declines, economic growth falls to zero by 2030, but income per person increases.

The **GreenLate scenario** describes a slower transformation of the energy system, with which greenhouse gas neutrality can just about be achieved in 2050. Measures and investments on a larger scale are only realised from 2040 onwards. Here, too, the energy supply is based entirely on renewable energies in 2050. Energy efficiency potential is only partially realised; final energy demand is reduced by 20 % in 2050 compared to 2020. High penetrations of directly electricity-based and thus systemically efficient technologies can only be realised by 2050 in areas of application with short renewal cycles and in areas with high investment incentives. Raw material efficiency and recycling potential will only be partially utilised. In GreenLate, the building stock is less modernised and refurbished compared to GreenSupreme. Even if e-mobility dominates private transport, heavy goods transport in 2050 will continue to be primarily characterised by combustion engines. This leads to a high demand for imported PtX fuels.

The **H<sub>2</sub> scenario** (TN-H<sub>2</sub>-G) from the family of “Long-term scenarios” (Sensfuß et al. 2021) relies on a very strong use of hydrogen in the energy system. The demand for hydrogen is met by electrolysis. In 2050, around 23% of the required quantity will be produced in Germany and the remaining share imported from neighbouring European countries. The added value of the industrial sector will grow by around 1% per year up to 2050. Progress is assumed in the efficient use of materials along the value chains right through to the end consumer sectors such as the construction industry. Substantial progress in the use of secondary products, for example in steel or plastics production, is also assumed in all scenarios for the circular economy. The final energy demand in 2050 is 24 % lower than in 2020.

The RESCUE scenarios and the long-term scenario were formulated and modelled for Germany and Europe respectively. Additionally, existing 1.5 °C and 2 °C transformation scenarios were used for the transformation in Europe without Germany and for the rest of the world in order to consider imports and a transfer of the energy transition in these regions (Teske et al. 2019).

#### **The overall economic demand for raw materials (URMOD-3R)**

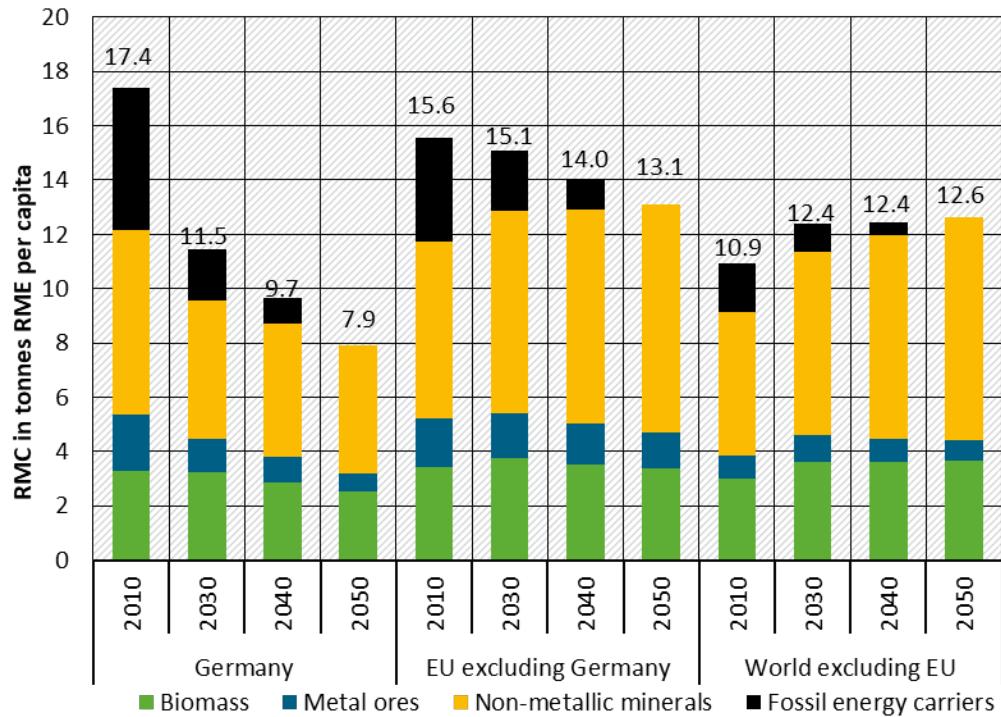
The multiregional environmental-economic resource model URMOD-3R is used to determine raw material consumption (RMC). The aim of URMOD-3R is to fully map the use of primary and secondary raw materials as well as primary and secondary renewable energies at a macroeconomic level. The further development of the model makes it possible to determine the consumption of raw materials at a macroeconomic level for the three regions Germany, EU without Germany and World without EU, the selected scenarios and base years (2030, 2040 and 2050). Further, it is now possible to specifically expand the input-output tables (IOT) for the key

technologies analysed in depth in the project as well as for certain raw materials and selected industrial sectors.

URMOD-3R is a multi-regional input-output model, the most important elements of which are the product interdependence matrix, the matrix of final domestic utilisation (LIV) and the resource matrix. The goods interdependence matrix seamlessly depicts the global interdependence of production activities in the form of goods transactions between the sectors (so-called intermediate consumption). The LIV shows the final demand for consumer and capital goods, broken down by final demand categories, product groups and regions. The resource matrix contains the primary and secondary resource input into the individual regions. From this, the cumulative (direct and indirect) resource expenditure of an economy's domestic demand can be calculated and individual resource expenditures can be allocated to specific final demand activities.

The results presented for this top-down approach relate exclusively to the GreenSupreme scenario. Compared to the other two scenarios, this is the scenario with the most ambitious transformation path and the lowest demand for raw materials. Figure 1 shows the development of raw material consumption (RMC) per capita (also known as the "raw material footprint") from 2010 to 2050 in the regions Germany (DE), EU without DE and World without EU. As can be seen, the assumed global energy transition means that fossil fuels will no longer be used in all three regions by 2050. Figure 1 illustrates how an ambitious transformation in Germany will reduce the raw material footprint from a comparatively high 17.4 tonnes of raw material equivalents (RME) to up to 7.9 tonnes of RME per capita by 2050. This corresponds to a reduction of 55% compared to the 2010 level, which means that in 2050 Germany will be significantly below the global average of 11.29 tonnes of RME per capita in 2010. In the EU excluding Germany, the RMC per capita will fall less in the same period, by around 17 %, while the RMC per capita in the World excluding EU will rise by 15 %. It should be noted that the per capita demand for raw materials in the World without EU in 2010 is at a significantly lower starting level compared to Germany and the EU without DE and will not yet reach the demand of the EU without DE in 2050.

**Figure 1: Raw material consumption (RMC) per capita by year in the GreenSupreme scenario**

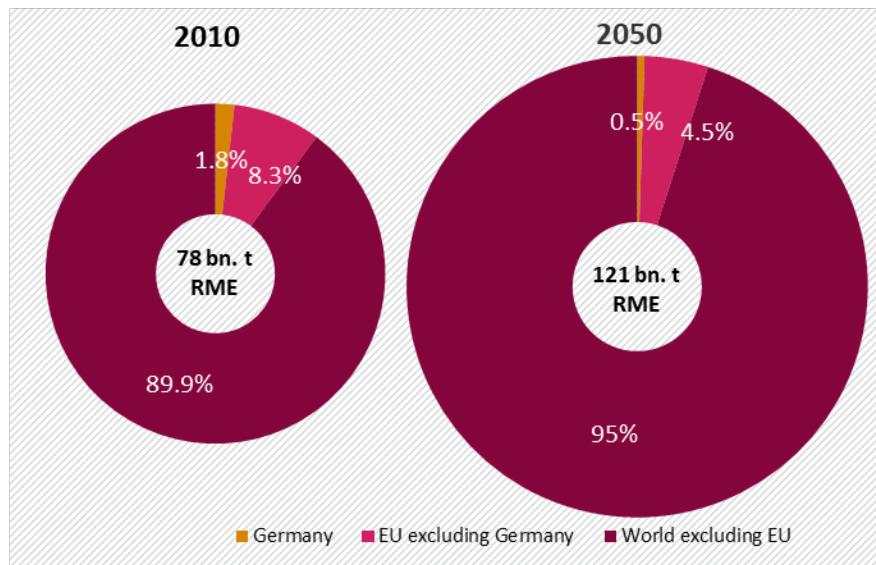


Source: own calculations URMOD-3R

The different developments in raw material requirements can mainly be explained by different assumptions regarding economic growth in the respective regions: While gross domestic product (GDP) per capita in Germany grows by around 26 % between 2010 and 2050, it almost doubles in the EU excluding DE (95 % growth) and increases by a factor of just under 2.5 in the World excluding EU (142 % growth).

Figure 2 shows the global consumption of primary raw materials in 2010 and 2050. Overall, the demand for primary raw materials will increase from 78 billion tonnes of RME in 2010 to 121 billion tonnes of RME in 2050. This is due to the projected increase in population from 6.4 billion in 2010 to 9.2 billion people in 2050 in the region World excluding EU and the simultaneous increase in RMC per capita in this region (see above). In the regions Germany and EU excluding DE, on the other hand, the population trend is slightly declining over the same period. The development of primary raw material consumption in the three regions shows that the assumed, significantly increased recycling rates and improvements in material efficiency have a subordinate influence compared to economic development and that catch-up effects and population growth in the World excluding EU characterise global primary raw material consumption.

**Figure 2:** Raw material consumption (RMC) 2010 and 2050 of the three regions in GreenSupreme



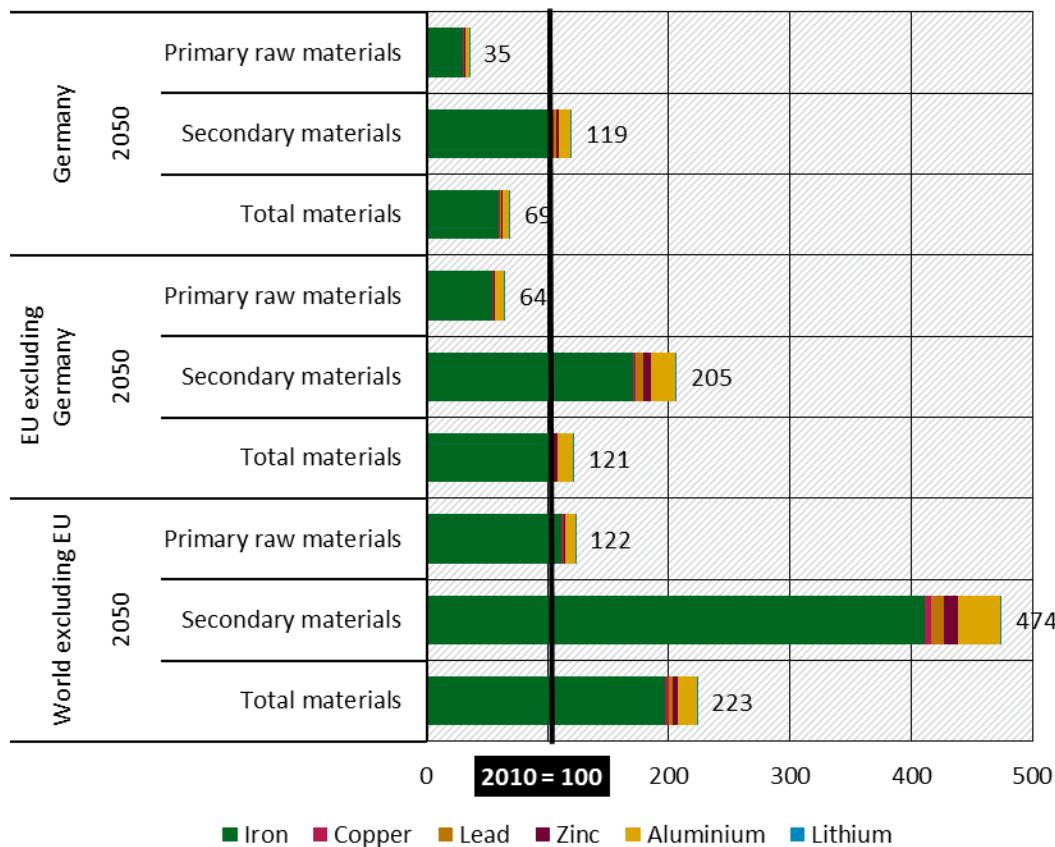
Source: own calculations URMOD-3R

Figure 2 also shows each region's share in the global demand for primary raw materials: While Germany has a disproportionately high consumption in 2010 compared to its share of the global population (1.17 %), the share of primary raw material consumption in 2050 in the GreenSupreme scenario is 0.5 %, which is below the share of the global population (0.82 %).

With regard to the key technologies of the energy transition, metals are of particular importance as a raw material (see Figure 3). The demand for primary metals develops differently in the regions up to 2050: For Germany, the demand decreases by 31 %, in the EU excluding DE there is an increase of 21 % and 153 % for the World excluding EU. A significant increase in the use of secondary metals can be seen in all regions, which is why the demand for primary metals will fall for Germany and the EU excluding DE (-65 % and -36 % respectively), while in the World excluding EU it will increase to a much lesser extent than the demand for metal as a whole (+22 %).

The differentiation between primary and secondary metals shows significantly different trends. The use of primary metals as a whole decreases by 65 % for DE (EU excluding DE -36 % and World excluding EU +22 %). In comparison, the cumulative content of secondary metals in the goods of the last domestic use increased across the board: Germany +19 %, EU excluding DE +105 % and World excluding EU +374 %. Due to increasing recycling rates, there are considerable savings in primary metal raw materials.

**Figure 3: Change in the use of selected primary and secondary metals (iron, copper, lead, zinc, aluminium and lithium) 2050 compared to 2010 in GreenSupreme**



Source: own calculations URMOD-3R

In all three regions, the share of raw material-intensive construction investments is increasing significantly, which also includes investments in the key technologies of the energy transition. Although these are rising sharply in all regions, they only account for a manageable proportion of total primary raw material consumption (1.3 - 1.6 % depending on the region). It should be noted, however, that 80 % of the raw materials used in key technologies consist of metals and therefore differ greatly from the composition of the remaining construction investments (approx. 6 % metal content). Overall, investments in key technologies account for approx. 12.8 % of global demand for metal ores in 2050.

Transferring these model results to reality allows the conclusion to be drawn that the raw material requirements of key technologies, in view of their relatively low overall raw material requirements, do not in principle stand in the way of implementing an ambitious energy transition. However, the high demand for individual metals can lead to conflicts with other metal-demanding sectors if the extraction volumes cannot be adjusted accordingly. The (following) bottom-up analyses come to the same conclusion.

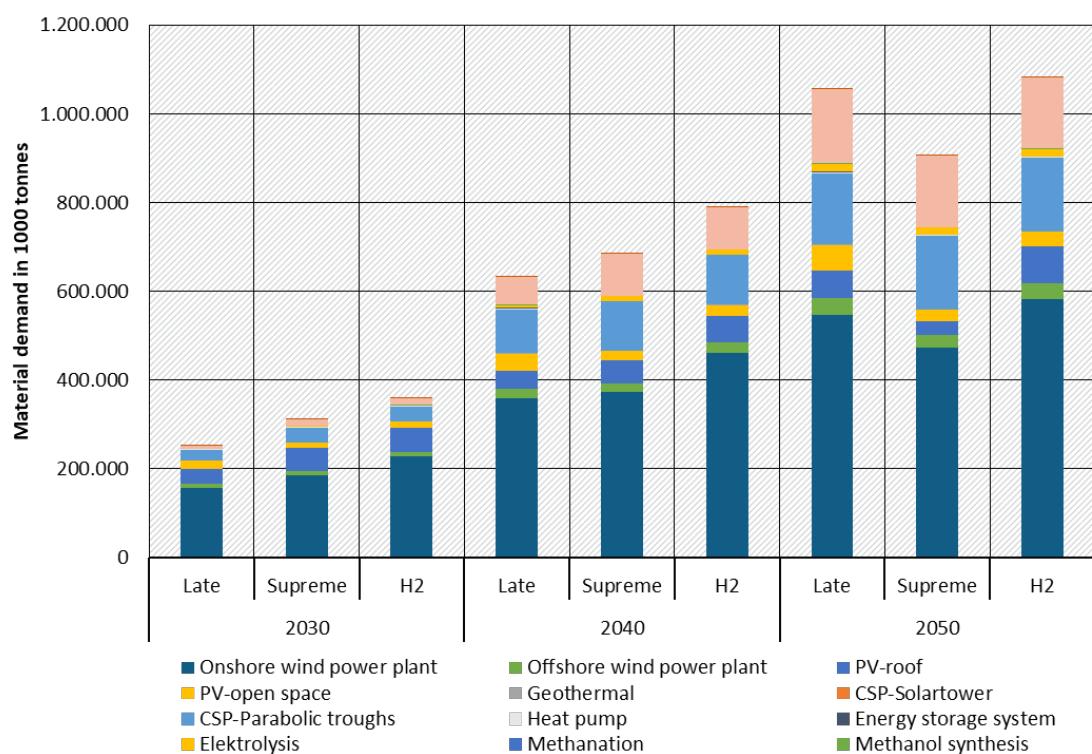
#### Raw material requirements of key technologies based on customised ecoinvent data sets (bottom-up)

In addition to the URMOD-3R (top-down) analyses, a second, bottom-up approach was used in the project to derive the raw material demands of the key technologies. For this purpose, ecoinvent data sets based on the adapted life cycle assessment model from (Liebich et al. 2023) were provided and analysed.

The calculations with the adapted databases of the LCA model provide specific results per unit of product (service) for the three scenarios, for the base years 2030, 2040, 2050 and for the three regions. These calculations are based on a different system boundary than the top-down approach using URDMOD-3R (Chapter 4). The differentiation by (up to 15) raw material categories allows a detailed insight into material requirements for each transformation pathway. The main focus of the analysis is on primary metals, mineral raw materials and plastics. Scrap quantities were not taken into account in this analysis.

The results (Figure 4) show that the raw material requirements associated with the expansion of key technologies worldwide are constantly increasing. In 2030, the global demand for raw materials still varies between 252 million tonnes and 358 million tonnes, depending on the scenario. In the target year 2050, a range of 907 million tonnes and 1,084 million tonnes is required. In this year, the GreenSupreme scenario presents itself as the transformation path with the lowest demand for raw materials.

**Figure 4: Global demand for raw materials for key technologies**



Source: own illustration, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Over time, a variation in raw material demand can be observed in the scenarios. In the first base year, 2030, global demand is initially lowest in the GreenLate scenario (252 million tonnes), which can be explained by the comparatively lower level of ambition with regard to rapid implementation of the transformation. In 2030 and 2040, demand is highest in the H2 scenario (358 million tonnes and 791 million tonnes respectively). In 2040, the demand in the GreenLate scenario (633 million tonnes) approaches the demand of the GreenSupreme scenario (687 million tonnes) more clearly. In the target year 2050, the demand for raw materials is again highest in the H2 scenario at 1,084 million tonnes. The GreenLate scenario (1,058 million tonnes) is only slightly lower, due to the need to catch up from the initially slow transformation and the fact that a large proportion of the plants already need to be replaced. The rapid implementation in the GreenSupreme scenario is reflected in the lowest demand in 2050 (907 million tonnes).

Germany accounts for 1-2 % of global raw material demand for key technologies; the EU excluding Germany accounts for 4-9 % of demand and the World excluding the EU accounts for 89-94%, depending on the scenario and year.

Five key technologies dominate the demand for raw materials. Onshore wind power plants account for the largest share (52-63 % depending on the scenario and year), followed by parabolic trough solar thermal power plant technology (9-18 %), rooftop PV systems (3-17 %), CO<sub>2</sub> supply (3-18 %), ground-mounted PV systems (3-8 %) and offshore wind power plants (3-4 %). All other key technologies have a share of 2 % or less.

A look at raw materials across all technologies (and regions, scenarios and years) shows a dominance of non-metallic raw material demand for sand and gravel (33-43 %), as well as cement and concrete (24-32 %). In terms of metals, iron and steel demand dominates (14-17 %), followed by aluminium (3-6 %) and copper (around 1 %).

For the four PtX energy carriers - hydrogen, PtG methane, PtL methanol and Fischer Tropsch (FT) fuels - both Germany and the EU excluding DE are (largely) dependent on imports from the World excluding EU to cover demand. Hydrogen is only imported directly by Germany in the H<sub>2</sub> scenario (additionally to domestic production). Apart from that, it is needed as an intermediate product for imported PtX products (PtL, PtG) made from it. In the GreenLate scenario, the raw materials required for imports to Germany are particularly high. In 2050, around 612 kt of raw materials will be required for H<sub>2</sub> provision as an intermediate product, which will be generated by German PtX imports in the World excluding EU. For PtL methanol synthesis, the figure is 61 kt of raw materials, 40 kt of raw materials for FT fuels and 41 kt of raw materials for PtG methane. In the EU excluding Germany, the raw material expenditure for PtX imports is also highest in 2050; for the GreenLate scenario, around 661 kt are required for H<sub>2</sub> provision as an intermediate product, 132 kt of raw materials for PtL methanol synthesis and a further 22 kt of raw material expenditure for FT fuels in the World excluding EU in order to meet the corresponding demand in the EU excluding Germany.

In relation to current production volumes (2022), none of the raw material demand determined and analysed for (exclusively) key technologies exceed current production levels. However, this analysis does not include the demand of other production areas. Nevertheless, aluminium in particular accounts for a remarkable share of 60 % in the H<sub>2</sub> scenario and 63 % in the GreenLate scenario; copper and other metals account for 26 % and 46 % respectively in 2050 in the H<sub>2</sub> scenario. Iron and steel vary between 2-10 % depending on the year and scenario. Plastics account for between 1-4 % and sand and gravel for between 1-2 % of current production volumes. For copper and aluminium in particular, these shares show that there may be conflicts with other raw material demands from other sectors and that an increase in production volumes will be relevant. Against this backdrop and the resulting potential increase in environmental pollution, the urgency of realising further raw material savings continues to grow.

### **Environmental costs of the transformation paths**

The raw material demand derived in the project are followed by the question of the consequences of "more" or "less" of these requirements in the various pathways. Every extraction of raw materials leads to environmental pollution and monetary damage and thus to costs for current and future society and its welfare. Against this background, selected environmental costs of the various transformation paths were determined. The Federal Environment Agency's recommendations on environmental cost rates (Matthey and Bünger 2020) were used as the methodological data basis.

Currently, the environmental costs of greenhouse gas (GHG) emissions caused by Germany's final energy demand in 2020 amount to 150 billion € if the welfare of current generations is weighted higher. If intergenerational equity is assumed and the welfare of future generations is therefore valued equally to that of current generations, then the current environmental costs of GHG emissions amount to 530 billion €.

The development of environmental costs over the support years clearly shows the monetary benefit of an ambitious transformation path compared to a hesitant development. In the ambitious GreenSupreme scenario, the rapid reduction of GHG emissions already avoids costs totalling 64 billion € in 2030 and thus achieves a reduction of 40 % compared to 2020. In the H<sub>2</sub> and GreenLate scenarios, on the other hand, the avoidance is only 48 billion € and 26 billion € respectively.

German energy demand not only has an environmental impact in Germany itself, but also to a large extent abroad. Quantifying the costs, for example in the form of health damage caused by particulate matter pollution, illustrates the responsibility Germany has towards societies outside its own borders and the social consequences and costs triggered by different transformation paths outside the German border. In addition, the high monetary benefit of an ambitious environmental policy for society provides an important argument in favour of extensive investment in it. This benefit is significantly higher if the welfare of current and future generations is weighted equally.

### **Conclusion and research needs**

The research work in the REFINE project allows a comprehensive assessment of the raw material demand for an ambitious transformation, both in Germany and in the two other regions EU without DE and World excluding EU. In this sub-report, an overall economic estimate of raw material consumption (RMC) was carried out using URMOD-3R. The raw material demand in isolation for the key technologies was estimated with a material-related evaluation of the customised ecoinvent datasets. The following key findings were obtained:

- ▶ With the ambitious transformation in the GreenSupreme scenario, primary raw material consumption in Germany can be reduced by 55 % to 7.9 tonnes of RME per capita by 2050. In the EU excluding DE, RMC per capita decreases more slowly and amounts to 13.1 tonnes of RME in 2050. In the region World excluding EU, there a catch-up effect can be observed and primary raw material consumption increases to 12.6 tonnes of RME per capita by 2050.
- ▶ In GreenSupreme, Germany's share of global resource demand in 2050 is significantly lower than its share of the global population and economic output. This is a clear reversal of the situation in 2010, in which Germany has a disproportionately high share of resource demand.
- ▶ In all three scenarios analysed, the raw material demand for the key technologies account for a manageable proportion of primary raw material consumption and therefore do not represent an obstacle to an ambitious and rapid implementation of the energy transition.
- ▶ The ambitious GreenSupreme scenario is the scenario with the lowest resource and raw material expenditure and environmental costs in 2050. The social benefits of a rapid and comprehensive transformation are particularly evident from the perspective of environmental costs.

There are still a number of aspects for which we see a need for research and further development opportunities. Currently, the further developed URMOD-3R model refers to the

base year 2010. The base year should be updated for future uses and scenarios should also be modelled at five-year intervals so that it is easier to react to new political developments, such as the change in the target year for greenhouse gas neutrality in Germany to 2045. To reduce complexity, the product group classification could also be reduced somewhat. The verification of renewable energies and the use of secondary metals should be retained. With the knowledge now gained through REFINE, the separate verification of key technologies and the associated level of detail for investments could be omitted again. The level of detail of the last domestic use could also be reduced.

A comparison of the results between the two modelling approaches URMOD-3R (top-down) and the prospective life cycle assessment method (bottom-up) was not planned in the REFINE project. We therefore see a comparative analysis of the two approaches and a discussion of possible synergies and possible combinations as an important starting point for further research.

In the course of the project, a new approach was developed for the raw material analyses of the key technologies using the adapted ecoinvent datasets by adding new information flows for primary and secondary metals to the LCA model. This enables direct analyses to be carried out more efficiently and accurately. The approach could not yet be applied in the project due to the restriction to metal raw materials, but it may also be possible to develop it for other raw materials and material groups.

## 1 Einführung

Das Umweltbundesamt (UBA) untersucht seit vielen Jahren, wie eine nachhaltige Entwicklung sowie eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Lebensweise erreicht werden kann. Mit der Studie „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE“ (Purr et al. 2019) zeigt das UBA, in weiten Teilen unterstützt durch das Forschungsprojekt „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“ (Dittrich et al. 2020a), anhand von sechs Szenarien mögliche Lösungs- und Handlungsspielräume für einen Transformationsprozess hin zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland bis 2050 auf. Die sechs „Green“-Szenarien beschreiben unterschiedlich ambitionierte Transformationspfade, die alle eine Gesamtminde rung der Treibhausgasemissionen zwischen 95 % und 97 % gegenüber 1990 und somit netto-null-Treibhausgasemissionen erreichen, ohne dass ein (technisches) Carbon Capture and Storage (CCS) erforderlich ist. Alle Szenarien gehen zudem mit einer Reduktion des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffkonsums, ausgedrückt als Raw Material Consumption (RMC) einher, der zu einem großen Anteil auf den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger zurückgeht.

Aufgrund der hohen Komplexität der systemischen Betrachtung konnten in RESCUE bei weitem nicht alle Aspekte des Nexus von Klima- und Ressourcenschutz betrachtet werden. Das Projekt „Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland (REFINE)“ baut auf RESCUE auf und vertieft offen gebliebene Fragen mit einer weitergehenden Zielsetzung. In REFINE werden folgende Fragen zentral untersucht:

- ▶ Wie ändert sich der Rohstoffbedarf Deutschlands für relevante Rohstoffe? Stehen die benötigten Rohstoffe in ausreichender Menge zur richtigen Zeit zur Verfügung?
- ▶ In welchem Verhältnis stehen die national eingesparten zu den durch die unterstellte Energiewende bedingten nationalen und internationalen Treibhausgas (THG)-Emissionen (v. a. Vorketten wie Rohstoffabbau/-verarbeitung, Halbwarenproduktion sowie erneuerbare Energien (EE)-Produktion für Deutschlands Importe)?
- ▶ Welche weiteren Umweltwirkungen im Ausland lösen wir durch die unterstellte Energiewende eventuell aus (inkl. Vorketten)?
- ▶ Lassen sich die Umweltwirkungen und Rohstoffbedarfe einer Übertragung der deutschen Energiewende auf andere Länder oder eine globale Energiewende abschätzen?

Um die Forschungsfragen in REFINE zu untersuchen, wurden zwei verschiedene methodische Ansätze angewendet und weiterentwickelt. Zur Untersuchung der Fragestellungen zu Umweltwirkungen, Rohstoff- bzw. Materialbedarfen für die Energiewende wurden die Ökobilanzmethode und Ökobilanzdatensätze verwendet (Bottom-up). Zur Abschätzung des gesamtkökonomischen Ressourcenbedarfs (Top-down) wurde das umweltökonomische Modell URMOD, das auch in RESCUE genutzt wurde, weiterentwickelt. Bei beiden methodischen Ansätzen wurde dabei die Frage, ob sich die Umweltwirkungen und Rohstoffbedarfe bei einer Übertragung der deutschen Energiewende auf andere Länder und die Welt abschätzen lassen, von Anfang an mitbetrachtet. Mit beiden Methoden wurden die Regionen Deutschland, Europa ohne Deutschland (EU ohne DE) und Welt ohne Europa (Welt ohne EU) untersucht.

Zur Untersuchung der Umweltwirkungen wurde die ecoinvent Datenbank<sup>5</sup> verwendet und mit der ecoinvent Association für Szenarientechniken in Richtung „prospektive Ökobilanzen“ entwickelt (Liebich et al. 2023). Schwerpunkte der Anpassung sind technologische Prozesse, die für die Energiewende relevant sind. Die Ergebnisse aus der Anpassung liefern spezifische Umweltwirkungen je Einheit Produkt/Dienstleistungen für die ausgewählten Szenarien, Regionen und Stützjahre. Basierend darauf lassen sich absolute Umweltwirkungen anhand installierter Kapazitäten und Produktionsmengen ermitteln. Konkrete Rohstoffbedarfe wurden ebenfalls anhand der für die Szenarien angepassten ecoinvent Datenbank ausgewertet. Im Projekt ist dies für ausgewählte Rohstoffe bzw. Materialien für die in REFINE betrachteten Schlüsseltechnologien umgesetzt.

Für die Ermittlung des Rohstoffkonsums (RMC, engl. raw material consumption) wurde das umweltökonomische Modell URMOD in Richtung eines multiregionalen Modells weiterentwickelt (URMOD-3R). Dadurch ist es möglich, den Rohstoffkonsum auf gesamtwirtschaftlicher Ebene für die drei Regionen, die ausgewählten Szenarien und Stützjahre zu ermitteln. Gegenüber RESCUE beinhaltet die Weiterentwicklung zudem eine weitere gezielte Ausweitung der Input-Output-Tabellen (IOT) für die in REFINE vertieft untersuchten Schlüsseltechnologien sowie für bestimmte Rohstoffe und ausgewählte Industriebranchen.

Der hier vorliegende Teilbericht Rohstoffe dokumentiert die Arbeiten und Ergebnisse zum Rohstoffbedarf aus der gesamtwirtschaftlichen Perspektive und in Bezug auf die einzelnen Schlüsseltechnologien. Auch beschreibt der Bericht die Methodik und den Aufbau des umweltökonomischen Modells URMOD und die Übertragung der Szenario-Annahmen in das Modell. Es wird eine Abschätzung vorgenommen, inwiefern die entstehenden Rohstoffbedarfe durch die bisherigen Fördermengen gedeckt werden können.

---

<sup>5</sup> Ecoinvent Version 3.7.1 (von Dezember 2020) in der Ausprägung Systemmodell „Cut-Off“

## 2 Zum Projekt

Das Projekt REFINE startete im November 2019 und wurde bis Ende Mai 2023 von Dr. Monika Dittrich geleitet; ab Juni 2023 lag die Projektleitung bei Regine Vogt.

Der Schlussbericht besteht aus zwei Teilen:

- ▶ Teilbericht Umweltwirkungen (Dittrich et al. 2024b)
- ▶ Teilbericht Rohstoffe (dieser Bericht (Dittrich et al. 2024a))

Veröffentlichte Projektdokumente umfassen zudem Excel-Anhangtabellen der Ergebnisse und „Steckbriefe für Schlüsseltechnologien“ als supporting information (Dittrich et al. 2024c).

Letztere wurden im Rahmen von Metaanalysen zu Schlüsseltechnologien und Rohstoffen erstellt, die gemeinsam mit dem Projektpartner Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI durchgeführt wurden. Diese waren zudem wesentlich an der Erstellung von Kurz- und Vertiefungsstudien zu Sekundäranteilen (Zwischenbericht, unveröffentlicht) beteiligt.

Zur Ermittlung spezifischer Umweltwirkungen wurde gemeinsam mit dem Projektpartner ecoinvent Association die ecoinvent-Datenbank angepasst. Methodische Arbeiten für die prospektive Ökobilanz wurden im ifeu entwickelt und sind z. B. in (Liebich et al. 2023) beschrieben. Anhand des insgesamt in REFINE entwickelten Ökobilanzmodells konnten, dank Weiterentwicklungen von Software und Programmtechniken, ab Sommer 2023 umfassend absolute Umweltwirkungen der Energiewende berechnet und analysiert werden. Die Ergebnisse finden sich im Teilbericht Umweltwirkungen.

Rohstoff- bzw. Materialbedarfe der Schlüsseltechnologien wurden basierend auf den angepassten ecoinvent-Datensätze zunächst auf spezifischer Ebene ermittelt. Für die Hochrechnung auf absolute Werte wurden durch das ifeu absolute Bedarfe aus den Studien recherchiert, die den drei REFINE-Szenarien zugrunde liegen (Kap. 3). Letztere bildeten zusammen mit weiteren Daten, Annahmen und Festlegungen die Eingangsdaten für URMOD-3R, das multiregionale umweltökonomische Ressourcenmodell. Die Methodik und Umsetzung in URMOD-3R zur Berechnung des Rohstoffkonsums erfolgte federführend durch den Projektpartner Dr. Karl Schoer (Schoer-Consult). Die Ergebnisse finden sich im Teilbericht Rohstoffe. Für eine umfassendere Dokumentation zur Methodik ist eine separate Veröffentlichung als ifeu paper in Bearbeitung (Schoer et al. 2024a).

### 3 Überblick über die Szenarien

Für das Projekt REFINE wurden die Szenarien GreenSupreme (Dittrich et al. 2020c) und GreenLate (Dittrich et al. 2020d) aus dem RESCUE-Projekt für eine vertiefende Betrachtung ausgewählt. Vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Entwicklungen zur Verschärfung der Treibhausgasminderungen und zur Entwicklung von grünem Wasserstoff wurde als weiteres Szenario das Wasserstoffszenario aus den BMWI-Langfristszenarien (Sensfuß et al. 2021) für Deutschland berücksichtigt.

Alle drei Szenarien erreichen Treibhausgasneutralität in 2050 (Netto-Null durch Reduktion der Treibhausgasemissionen von mind. 95 % gegenüber 1990 und Nutzung von natürlichen Senken). Das Zieljahr 2050 wurde für REFINE beibehalten, da sich alle Szenarien hierauf beziehen und für Deutschland keine aktuellen Szenarien für das Zieljahr 2045 verfügbar waren, bis zu dem Deutschland nach der Novelle des Klimaschutzgesetzes<sup>6</sup> vom 18.08.2021 treibhausgasneutral werden soll.

Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Transformationsgeschwindigkeit und der Struktur der eingesetzten Technologien. Auch die Annahmen zu gesellschaftlichen Veränderungen sind unterschiedlich.

Die Szenarien wurden für Deutschland formuliert. Um einerseits die Importe abzudecken und andererseits auch eine Übertragung der Energiewende betrachten zu können, müssen Annahmen für die Entwicklungen außerhalb Europas getroffen werden. Im Projekt REFINE wurde hierfür auf vorhandene Szenarien zurückgegriffen. Für die Transformation in Europa ohne Deutschland (EU ohne DE) und in der Welt ohne Europa (Welt ohne EU) wurden verschiedene Szenarien dahingehend analysiert, wie gut sie zu den Annahmen der „deutschen“ Szenarien passen. Relevante Kriterien bei der Auswahl waren:

- ▶ das Ambitionsniveau bei den Minderungen der THG-Emissionen: so sollte ein möglichst ähnliches Reduktionsniveau in 2030 und in 2050 wie in GreenSupreme bzw. GreenLate erreicht werden,
- ▶ die grundsätzliche „Philosophie“ einer technologisch innovativen, offenen Wirtschaft und einer Gesellschaft, die die Transformation mehr (GreenSupreme) oder weniger (GreenLate) unterstützt,
- ▶ die gewählten Technologien zur Energieerzeugung sollten vergleichbar sein; das bedeutet, dass Transformationsszenarien mit hohen Anteilen der energetischen Nutzung von Primärbiomasse und Kernkraft sowie Szenarien, die Carbon Capture and Storage (CCS) in erheblichem Umfang unterstellen, nicht in Betracht kamen.

Im Ergebnis wurden für das Projekt REFINE hierfür die 1,5°- und 2°-Szenarien von (Teske et al. 2019) ausgewählt. Nachfolgend sind zunächst die Szenarien für Deutschland beschrieben (GreenSupreme, GreenLate, H<sub>2</sub>-Szenario) und im Anschluss die für die Übertragung auf die EU (ohne DE) und die Welt (ohne EU) gewählten Szenarien nach (Teske et al. 2019) sowie deren Zuordnung zu den drei REFINE-Szenarien.

#### 3.1 GreenSupreme

GreenSupreme beschreibt eine schnelle und tiefgreifende Transformation des Energiesystems, mit der im Jahr 2050 unter Berücksichtigung der Senken eine vollständige

---

<sup>6</sup> Die Gesetzesnovelle ist am 31. August 2021 in Kraft getreten.

Treibhausgasneutralität erreicht werden kann. GreenSupreme ist das ambitionierteste der sechs RESCUE-Szenarien.

In GreenSupreme findet ein zügiger Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe statt. Bereits 2030 wird der Strom vollständig auf der Basis von erneuerbaren Energien produziert. Der Umstieg auf strombasierte Techniken in anderen Sektoren (Mobilität, Wohnen, Industrie) vollzieht sich schnell. Kohle wird bereits in 2040 auch in der Industrie nicht mehr genutzt. Optionen zur Erschließung von Energieeinsparungen werden erschlossen, sodass der Endenergiebedarf über alle Anwendungsbereiche in 2050 bei 1.366 TWh liegt. Den größten Anteil von 661 TWh verbraucht die Industrie (48,4 %), 286 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (19,1 %), Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) (17 %) und – was beachtlich ist – an letzter Stelle dem Verkehr (15,5 %). Die nationale Nettostromerzeugung steigt auf insgesamt 740,7 TWh in 2050, und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien gedeckt. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Technologien im Transformationspfad. Neue Energieträger (Power to X, PtX-Technologien) substituieren fossile Rohstoffe in der Chemie- und Metallindustrie. Darüber hinaus werden sie in Bereichen eingesetzt, in denen eine Umstellung auf die direkte Stromnutzung schwer möglich ist. Beispiele sind der Flugverkehr oder bestimmte Nutzfahrzeuge.

In GreenSupreme steigt die Materialeffizienz in allen Sektoren stark an, zurückgehend auf die Erschließung von Ressourceneffizienzmaßnahmen, Recyclingpotenzialen und der Umsetzung von Materialsubstitutionen, einschließlich der Substitution von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe. In GreenSupreme werden weitgehende Veränderungen der Konsumgewohnheiten angenommen, beispielsweise bei den Ernährungsgewohnheiten, der Mobilität, den Wohnansprüchen und den allgemeinen Kaufkriterien. So nutzen beispielsweise Menschen treibhausgasintensive Verkehrsträger seltener und dafür mehr Rad- und Fußverkehr sowie Angebote des ÖPNV und von Sharing-Diensten.

Im GreenSupreme-Szenario sinkt die Bevölkerung Deutschlands. Das Wirtschaftswachstum geht bis 2030 auf Null zurück, zwischen 2030 und 2050 wurde eine Wachstumsbefreiung angenommen. Das Einkommen pro Person steigt in Folge an. Die Produktionsmengen gehen daher in einigen Industrien (u.a. in der Zement- und Betonproduktion oder in der Stahlproduktion) zurück, während in anderen Industrien die Produktionsmengen konstant bleiben oder steigen (darunter Vorprodukte für Erneuerbare Energien (EE)-Technologien).

GreenSupreme beschreibt somit im Vergleich zu anderen Green-Szenarien den Pfad mit den sehr weitgehenden, technisch möglichen Änderungen und gleichzeitig sehr weitgehenden Änderungen des Konsumverhaltens der Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung einer sehr schnellen Transformation. Ausführliche Beschreibungen des Szenarios finden sich unter (Purr et al. 2019) und (Dittrich et al. 2020c).

### 3.2 GreenLate

GreenLate beschreibt eine langsame Transformation des Energiesystems, mit der im Jahr 2050 gerade eben eine Treibhausgasneutralität erreicht werden kann. GreenLate ist das am wenigsten ambitionierteste der sechs RESCUE-Szenarien.

Der Wille zur Umsetzung von Klimaschutz, Dekarbonisierung und mehr Ressourcenschutz ist im GreenLate-Szenario in den ersten Jahren begrenzt. Die erforderlichen Maßnahmen und Investitionen, um eine THG-Minderung um rund 95 % gegenüber 1990 zu erreichen, müssen daher größtenteils in einem kürzeren Zeitraum und später, am Ende der ersten Jahrhunderthälfte, realisiert werden.

Die Energieversorgung beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien. Die Möglichkeiten zum Heben von Energieeffizienzpotentialen werden nur teilweise genutzt, was zu einem hohen Energiebedarf führt. Im GreenLate-Szenario liegt der Endenergiebedarf in 2050 bei 2.071 TWh und damit höher als in GreenSupreme. Den größten Anteil von 902 TWh verbraucht die Industrie (43,5 %), 282 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (20,6 %), dem Verkehr (20,7 %) und GHD (15,2 %).

Durch das verspätete Handeln werden Entwicklung und Einführung THG-armer Technologien in den Anwendungsbereichen verpasst. Hohe Durchdringungen direkt strombasierter und damit systemisch effizienter Techniken können bis 2050 nur noch in Anwendungsbereichen mit kurzen Erneuerungszyklen und in Bereichen mit hohen Investitionsanreizen realisiert werden. Konventionelle Energietechniken sind nach wie vor im Einsatz; für diese wird der Import erneuerbar erzeugter, strombasierter Energieträger notwendig.

Das geringere gesellschaftliche Verständnis für das Heben von Material- und Energieeffizienzpotentialen führt auch zu einem verringerten Innovationsdruck in der Produktion. Rohstoffeffizienz- und Recyclingpotentiale werden nur zum Teil ausgeschöpft.

In GreenLate ist der Gebäudebestand weniger modernisiert und saniert im Vergleich zu GreenSupreme. Die Nachfrage nach Wohnfläche steigt, da die Gesellschaft nur zu begrenzten Veränderungen bereit ist. Dies trifft auch auf den Bereich Mobilität zu, auch wenn die Elektromobilität bis 2050 den Bestand dominiert. Im Straßenschwerlastverkehr ist die Umstrukturierung bis 2050 nicht abgeschlossen, weil infrastrukturelle Ausbauten, Forschung und Entwicklung in die Elektrifizierung erst verzögert angegangen werden. Dementsprechend ist der Schwerlastverkehr 2050 weiterhin von Verbrennungskraftmaschinen geprägt. Die Kombination aus dem Festhalten an konventionellen Techniken, geringerem Fortschritt in effizienteren Antriebstechniken und geringer Verkehrsvermeidung und -verlagerung führt zu hohen erneuerbaren Kraftstoffbedarfen.

Auch die Umstrukturierung der Landwirtschaft hin zu einer emissionsarmen, modernen und nachhaltigen Landwirtschaft erfolgt verzögert. Technische Treibhausgasminderungsmaßnahmen, wie reduzierter Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement, werden zu Beginn nur langsam und dann größtenteils schneller umgesetzt.

Durch den verzögerten Anstieg des Ambitionsniveaus bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Szenario verdeutlicht GreenLate, welche Herausforderungen verspätetes Handeln bei der Erreichung einer THG-Minderung um 95 % bis 2050 mit sich bringt. Ausführliche Beschreibungen des Szenarios finden sich unter (Purr et al. 2019) und (Dittrich et al. 2020d).

### 3.3 Das Wasserstoffszenario TN-H<sub>2</sub>-G

Bei diesem Szenario handelt es sich um eines der sogenannten Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, die durch ein Konsortium aus Fraunhofer ISI, consentec, ifeu und TU Berlin im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erstellt wurden. Für die Neuberechnung in 2021 wurde die Szenarienfamilie um die TN-Szenarien (treibhausgasneutral bis 2050) ergänzt. Eines der drei Hauptzenarien ist das TN-H<sub>2</sub>-G Szenario, das die Auswirkungen eines sehr starken Einsatzes von Wasserstoff im deutschen Energiesystem analysiert.

Das Szenario erreicht eine Treibhausgasemissionsminderung von 55 % gegenüber 1990 im Jahr 2030 und 97 % im Jahr 2050. Bedingt durch Prozesse aus über 20 verschiedenen Kategorien

bleiben lediglich 7-8 Mio. t an Emissionen für das Jahr 2050. Fossile Energieträger werden bis dahin komplett verdrängt, wobei Wasserstoff im Szenario als bevorzugter Ersatz sowohl für die stoffliche wie auch die energetische Nutzung angenommen wird. Hierfür wird vom Aufbau einer umfassenden Infrastruktur bis 2050 ausgegangen. Diese ermöglicht einen Wasserstofftransport bis in die kleinteilige Verteilebene hinein, sodass Wasserstoff in Deutschland flächendeckend verfügbar sein wird.

Im Industriesektor wird von einem weiteren Wachstum der Wertschöpfung um 1 % pro Jahr ausgegangen. Durch Steigerung der Materialeffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette bis zum Endverbrauch können die Produktionsmengen der energieintensiven Grundstoffe dabei jedoch konstant gehalten werden oder sogar leichte Minderungen erzielt werden. Neben Materialeffizienzmaßnahmen wird auch von der umgreifenden Verbreitung von Energieeffizienz- und Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen ausgegangen. So steigen die Sekundäreinsatzquoten beispielsweise in der Stahl- und Kunststoffindustrie deutlich. Für neue Treibhausgas-neutrale Herstellungsverfahren wird eine volle Marktreife und industrielle Skalierbarkeit im Jahr 2025/2030 angenommen. Besonders in den energieintensiven Industrien von Chemie, Stahl und Zement, aber auch darüber hinaus werden diese Verfahren dann eine Diffusion von 100 % erreichen. Zusätzlich wird Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als Rohstoff etabliert und über den Kunststofflebenszyklus kreislauffähig gemacht. Dies beinhaltet eine Abscheidung des  $\text{CO}_2$  für den Transport zu entsprechenden Verwendungen, also die Annahme der Verbreitung von Carbon Capture and Utilisation (CCU). Da auch in der Industrie von einer vollständigen Verdrängung fossiler Energieträger und bevorzugtem Einsatz von Wasserstoff ausgegangen wird, wird ein umfangreicher Umbau des industriellen Anlagenbestandes angenommen. So werden beispielsweise Brenner in den vielen unterschiedlichen Öfen und Dampfkesseln auf Wasserstoff umgestellt.

Bis 2050 sinkt durch diese Maßnahmen der Energieverbrauch der Industrie um 21 %. Hierbei muss allerdings der Einfluss der Systemgrenzen beachtet werden. Der Energiebedarf für die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse wurde im Szenario nicht der Industrie, sondern dem Umwandlungssektor zugeschlagen. Neben der deutlichen Senkung des Energieverbrauchs ändert sich auch die Zusammensetzung der Energieträger für die Industrie grundlegend. Die Verwendung von Wasserstoff steigt zunächst langsam auf 45 TWh in 2030, in den Jahren 2030 bis 2040 dann jedoch sehr deutlich bis auf 464 TWh in 2050. Wasserstoff hat damit 2050 einen Anteil von 60 % am Gesamtenergieverbrauch der Industrie. Was die regionale Verteilung angeht, wird im Wasserstoffszenario durch das flächendeckende Angebot von einem gewissen Grundbedarf an Wasserstoff aller Landkreise ausgegangen. 49 der 401 NUTS-Regionen weisen einen größeren Bedarf von über einer TWh pro Jahr auf.

Aus dem Verkehrssektor gibt es bis 2030 keine relevante Wasserstoffnachfrage. Danach steigt diese jedoch bis auf 129 TWh im Jahr 2050 an. Auch im Wasserstoffszenario wird von einer starken Transformation zur Elektromobilität ausgegangen. Im Pkw-Bereich wird zwar ein Anteil von etwa einem Viertel Brennstoffzellenfahrzeuge an der Flotte erreicht, batterieelektrische Fahrzeuge stellen jedoch die große Mehrheit der Flotte dar. Im Bereich der Nutzfahrzeuge findet die Dekarbonisierung stärker durch Wasserstoff statt, insbesondere im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge. 2050 macht Wasserstoff damit knapp ein Drittel der Endenergiennachfrage aus dem Verkehrssektor aus.

Ähnlich wie im Verkehrssektor wird auch für den Gebäudesektor kein Wasserstoffbedarf bis 2030 projiziert. Bis 2050 steigt dieser jedoch auf 184 TWh. Dies entspricht etwa einem Drittel des Endenergiebedarfs des Gebäudesektors. Während insgesamt von einer stetigen Reduktion der Energienachfrage ausgegangen wird (26 % Minderung in 2050 gegenüber 2020), findet gleichzeitig eine signifikante Verlagerung der Energieträger statt. Hierfür ist sowohl eine

Anpassung der Gasnetze als auch ein Austausch der Wärmeerzeuger nötig. Mit der Wasserstoffnutzung können jedoch die bestehenden Verbrennungstechnologien beibehalten werden, was als günstiger im Vergleich zum Umstieg auf Power-to-Gas (PtG) angesehen wird.

Weitere 23 TWh Wasserstoffnachfrage werden im Jahr 2050 vom Umwandlungssektor erwartet. Insgesamt wird so von einer Steigerung des Wasserstoffbedarfs auf 791 TWh im Jahr 2050 ausgegangen<sup>7</sup>. Hiervon können 180 TWh durch Elektrolyse in Deutschland bereitgestellt werden. Weitere 611 TWh müssen nach Deutschland importiert werden. Die Stromnachfrage liegt in diesem Szenario damit bei 943 TWh in 2050, wovon knapp 260 TWh oder 28 % auf die Elektrolyse und damit die Herstellung von Wasserstoff entfallen. Weitere große Anteile entfallen mit jeweils 110 TWh oder 12 % auf die Elektromobilität und den Einsatz von Wärmepumpen.

Das Szenario ist unter (Sensfuß et al. 2021) und (Lux et al. 2021) dokumentiert. Im Projekt REFINE wird das Szenario als H<sub>2</sub>-Szenario bezeichnet.

### 3.4 Szenarien für Europa (ohne Deutschland) und die Welt (ohne Europa)

Für die Transformation in der EU ohne DE und die Welt ohne EU wurde auf die 1,5°- und 2°-Szenarien von (Teske et al. 2019) zurückgegriffen.

(Teske et al. 2019) modellierten insgesamt drei Szenarien<sup>8</sup> basierend auf heutigen Technologien, Energiestrukturen und Kostensätzen und zeigen technologisch machbare Transformationswege auf. Technologien wie CCS, die gegenwärtig erst entwickelt werden, wurden nicht berücksichtigt. Regionale Präferenzen für Energieerzeugung wurden jedoch berücksichtigt, so spielt beispielsweise Biomasse in Südamerika weiterhin eine Rolle in der Energieerzeugung. Wie auch in den Szenarien für Deutschland sind Solarenergie und Windkraft die dominierenden Technologien, zusätzlich erhält CSP (Concentrated Solar Power) mit Wärmespeicherung eine relevante Rolle (eine aufgrund der geographischen Lage in Deutschland nicht genutzte Technologie).

Die Modellierung erfolgte mit einem Bottom-up/Top-Down Ansatz, Kostenoptimierungen wurden nicht berücksichtigt. Modelliert wurde der Energiesektor, der Verkehr, Energie für den Gebäudebereich und für die Industrie. Die Szenarien berücksichtigen alle Regionen weltweit, aufgeteilt in 14 Regionen.

Sowohl das 2°- als auch das 1,5°-Szenario sind Zielerreichungsszenarien, mit denen vorgegebene THG-Emissionsbudgets erreicht werden:

- ▶ Im 2°-Szenario liegt das CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget zwischen 2015 und 2050 bei rund 590 Gt. In 2050 wird eine Treibhausgasneutralität erreicht, das bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Null liegen. Andere THG-Emissionen stehen nicht im Zentrum, es wird angenommen, dass sie zurückgehen und durch Senken ausgeglichen werden. Die Transformation verläuft verzögert, weil politische, ökonomische und gesellschaftliche Prozesse nicht optimal verlaufen.
- ▶ Im 1,5°-Szenario ist das zwischen 2015 und 2050 verbleibende CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget mit 450 Gt vorgegeben. In diesem Szenario wird die Transformation vor allem sehr zügig und weitgehend umgesetzt. Das Szenario berücksichtigt alle umsetzbaren, technologischen

---

<sup>7</sup> In den TN-Szenarien der Langfristszenarien wurde ein Teil des nicht-energetischen Einsatzes von Energieträgern für die Industrie vernachlässigt; für 2020 beträgt die Fehlmenge 125 TWh bzw. 47 % rohstofflich genutzten Energieinputs der Industrie. Für REFINE wurde der Fehlanteil auf die zukünftigen Jahre übertragen und die Werte korrigiert.

<sup>8</sup> Das dritte Szenario ist das (rund) 5°-Szenario, das die Politiken basierend auf dem World Energy Outlook 2017 der IEA nutzt. Dieses Szenario wird in REFINE nicht verwendet.

Maßnahmen, ohne gesellschaftliche bzw. politische Risiken und Hemmnisse zu berücksichtigen. Effizienzpotenziale sowie EE-Technologien werden schnell in der Breite gehoben bzw. entwickelt. Auch in weniger entwickelten Regionen werden (ohne Übergang über fossile Energie) sofort effiziente, auf erneuerbaren Energien basierende Technologien eingesetzt.

Die Szenarien mit zugrundeliegenden Annahmen und Ergebnissen sind ausführlich unter (Teske et al. 2019) beschrieben.

Folgendermaßen werden die Szenarien in den Basisszenarien im Projekt REFINE genutzt:

- ▶ Das 1,5°-Szenario passt hinsichtlich des Ambitionsniveaus bei der Reduktion der THG-Emissionen und bei der Schnelligkeit der Reduktion insgesamt recht gut zur Ausrichtung von GreenSupreme und wird daher im GreenSupreme-Szenario für die Transformation in Europa (ohne DE) und in der Welt (ohne EU) genutzt.
- ▶ Das 1,5°-Szenario wird auch im H<sub>2</sub>-Szenario für die Transformation in Europa (ohne DE) und der Welt (ohne EU) unterstellt. Der wesentliche Grund ist, dass dadurch die Ergebnisse zwischen GreenSupreme und dem Wasserstoffszenario besser vergleichbar sind.
- ▶ Das 2°-Szenario erreicht in 2050 weitgehend eine Treibhausgasneutralität, die Umstellungen erfolgen aber langsamer als im 1,5°-Szenario. Daher wird in GreenLate für Europa (ohne DE) und die Welt (ohne EU) auf dieses Szenario zurückgegriffen. In GreenLate wurde angenommen, dass die Umstellungen in der Welt (ohne EU) im Jahr 2050 nicht abgeschlossen sind; bei (Teske et al. 2019) sind sie dies jedoch. Das heißt, die Annahme der um zehn Jahre verzögerten Transformation für GreenLate in RESCUE wird in REFINE für Regionen außerhalb Deutschlands nicht übernommen. Um die neuen CCS-Technologien, die in mehreren Ländern als akzeptabel angenommen werden, im Szenario aufzunehmen, wird unterstellt, dass ein Teil der THG-Emissionen in der Welt (ohne EU) mit CCS reduziert wird.

## 4 Methodik des umweltökonomischen Ressourcenmodells URMOD-3R

### 4.1 Basismodell für das Jahr 2010

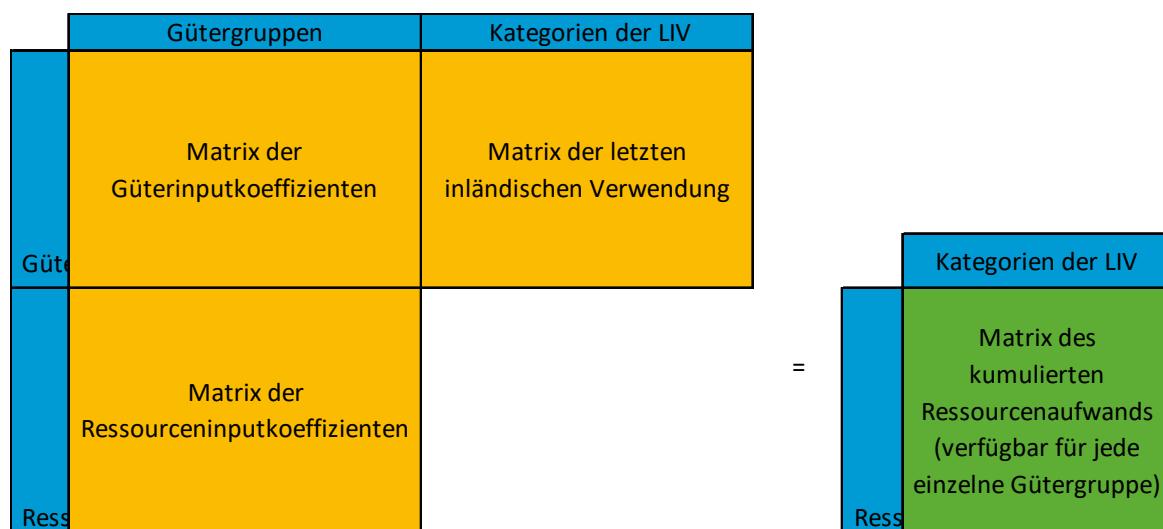
#### 4.1.1 Konzept für das Basismodell

Das multiregionale umweltökonomische Ressourcenmodell URMOD-3R hat das Ziel, die gesamtwirtschaftliche Verwendung von primären Ressourcen (aus der Umwelt extrahierte Primärrohstoffe, durch Umweltnutzung gewonnene primäre erneuerbare Energien) und von Sekundärressourcen aus der stofflichen und energetischen Verwertung von Abfällen lückenlos und in konsistenter Weise aus der Nachfragesicht abzubilden.

Das Modell beruht auf dem sogenannten **Leontief-Verfahren** (Matrix der inversen (kumulierten) Inputkoeffizienten). Mit Hilfe der Leontief-Methode (zur technischen Beschreibung des Leontief-Verfahrens siehe Schoer et al. 2024b) werden die von einer Volkswirtschaft direkt oder indirekt in Anspruch genommenen Ressourcen den Gütern der letzten inländischen Verwendung (LIV) zugerechnet (kumulierter Ressourcenaufwand). Damit kann untersucht werden, welche Ressourcenansprüche durch welche Endnachfrageaktivitäten ausgelöst werden.

Der für URMOD-3R verwendete Leontief Ansatz beruht auf einer weltweiten Input-Output Tabelle (IOT). Relevant für das Ressourcenmodell sind davon die beiden IOT-Elemente Güterverflechtungsmatrix (Vorleistungsmatrix) und Matrix der letzten inländischen Verwendung. Für Zwecke des Ressourcenmodells wird zusätzlich eine Ressourcenmatrix benötigt, welche den Ressourceninput in die Ökonomie darstellt. Das Modell wird in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

**Abbildung 1: Leontief-Modell zur Allokation von Primärrohstoffen und weiteren Ressourcen auf die Güter der letzten inländischen Verwendung (LIV) - Schematische Darstellung**



Quelle: Eigene Darstellung

Die symmetrische Güterverflechtungsmatrix bildet die weltweiten Lieferbeziehungen zwischen den Produktionsaktivitäten (jeweils Gütergruppen nach Regionen) lückenlos ab. Die Spaltenvektoren der Güterverflechtungsmatrix beschreiben die Produktionstechnologie der jeweiligen Produktionsaktivität.

Die Matrix der letzten inländischen Verwendung stellt die Endnachfrage nach Konsum- und Investitionsgütern dar, gegliedert nach Endnachfragekategorien, Gütergruppen und Regionen.

Die spezielle Ressourcenmatrix für URMOD-3R berücksichtigt folgende Ressourcen: Primäre Rohstoffe, die aus der Umwelt extrahiert wurden, primäre erneuerbare Energien, die ebenfalls auf der Nutzung von natürlichen Ressourcen beruhen (z. B. Wasserkraft, Windkraft, Photovoltaik, Geothermie), sowie Sekundärressourcen (Sekundärrohstoffe und Sekundärenergie), die durch die stoffliche und energetische Verwertung von Abfällen gewonnen wurden. Die Matrix ist gegliedert nach Ressourcenarten, Gütergruppen und Regionen. Die Gliederung nach Gütergruppen und Regionen ist für alle drei Matrizen identisch.

Die Güterverflechtungsmatrix und die Ressourcenmatrix werden für die Zwecke des Leontief-Verfahrens rechentechnisch jeweils in Koeffizienten-Matrizen (Güterinput je Einheit Output bzw. Ressourceninput je Einheit Output) umgewandelt.

URMOD-3R wurde, aufbauend auf der URMOD-Version aus dem Vorläuferprojekt RESCUE (Purr et al. 2019), als ein integriertes, hochauflösendes und hybrides multi-regionales IOT-Modell konzipiert, das nach den Regionen Deutschland, EU28 ohne Deutschland und übrige Welt unterteilt ist. Mit der Beschränkung auf nur drei Regionen geht einerseits, verglichen mit regional tiefer gegliederten Modellen<sup>9</sup>, grundsätzlich ein gewisser Genauigkeitsverlust einher. Andererseits ist aber zu berücksichtigen, dass die technische Handhabung sich wesentlich vereinfacht, insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit und die Qualitätskontrolle der Vielzahl an verwendeten Ausgangsdaten.

URMOD-3R lässt sich durch folgende Merkmale charakterisieren:

- ▶ **Politikorientierung:** URMOD-3R ist in erster Linie für die Unterstützung der umweltökonomischen Politik in Bezug auf Ressourcennutzung und Klimawandel konzipiert. Kernziel von URMOD-3R ist es, Fußabdrücke für primäre Rohstoffe und weitere Ressourcen mit einem möglichst hohen Genauigkeitsgrad bereitzustellen. Darüber hinaus ist URMOD-3R vor allem ausgerichtet auf die Analyse zu den Themen Schlüsseltechnologien für den Umbau des Energiesystems, Materialeffizienzsteigerungen u. a. durch Recycling sowie Lebensstiländerungen in den Bereichen Ernährung, Verkehr und Wohnen.
- ▶ **Modellierung von Szenarien:** Durch Szenarien können verschiedene Optionen für eine zukünftige Entwicklung analysiert werden. Basisjahr für dieses Modell ist das Jahr 2010. Die betrachteten Jahre der Szenarien sind 2030, 2040 und 2050.
- ▶ **Drei Regionen:** URMOD-3R ist nach drei Regionen gegliedert, Deutschland, EU28 ohne Deutschland und übrige Welt ohne Europa. Der integrierte multi-regionale Ansatz verbessert im Vergleich zu Einländer-Modellen insbesondere die Genauigkeit bei der Schätzung des Ressourcengehalts der Importe der betrachteten Ökonomie. Darüber hinaus ermöglicht der multi-regionale Ansatz es auch, anders als beim Vorläuferprojekt RESCUE, den Ressourcenbedarf auch im weltweiten Kontext abzubilden.
- ▶ **Hohe sektorale Auflösung:** URMOD-3R ist nach 299 Gütergruppen je Region unterteilt. Bei der konkreten Ausgestaltung der sektoralen Struktur von URMOD-3R lagen insbesondere zwei Gesichtspunkte zu Grunde:
  - a) Optimierung der Allokation der Ressourcen auf die Güter der letzten inländischen Verwendung und

---

<sup>9</sup> Zu regional tief gegliederten IOTs, siehe (Lenzen et al. 2013; Stadler et al. 2018; Tukker et al. 2009).

- b) Bereithaltung passgenauer Steuerungsparameter für die Umsetzung der Szenario-Annahmen.
- Mit Bezug auf Punkt a) kommt es darauf an, insbesondere ressourcenintensive Produktionsaktivitäten möglichst detailliert im Modell abzubilden.<sup>10</sup> Besonderes Augenmerk lag in diesem Zusammenhang auf der Beobachtung energieintensiver Produktions- und Konsumaktivitäten. Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes war die Betrachtung des Aufkommens und der Verwendung von Sekundärrohstoffen (ausgewählte Metalle, wie Eisen, Kupfer, Aluminium, Blei, Zink, Lithium und ausgewählte sonstige Materialien, Holz, Papier, Glas, Kunststoffe), was sich im Modell u. a. in einer entsprechenden Aufgliederung des Abfallbereichs niederschlägt.
  - Bezogen auf Punkt b) Steuerungsparameter für Szenarien muss berücksichtigt werden, dass die Gütergruppengliederung - und entsprechend auch die Struktur der Endnachfragematrix (siehe Punkt Disaggregation der Kategorien der letzten inländischen Verwendung) – auch darauf ausgerichtet sein muss, für das Modell die entsprechenden Steuerungsparameter für die Implementierung der Szenario-Annahmen zur Verfügung zu stellen. Besonderes Augenmerk wurde deshalb auf eine möglichst detaillierte Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Energieerzeugung auf allen drei relevanten Ebenen gelegt, nämlich den Energieerzeugungs- und Energieumwandlungsaktivitäten, den Bauaktivitäten zur Herstellung der dafür benötigten Anlagen und den entsprechenden Investitionsaktivitäten. Weitere wichtige Themen für die Analysen sind auch die Betrachtung von Lebensstiländerungen bezüglich Ernährung und der Nachfrage nach Verkehrsdiensleitungen. Dies sind in erster Linie Themen für die Gliederung der Endnachfragematrix. Da diese Matrix aber neben der Unterteilung nach Endnachfragekategorien auch die Dimension Gütergruppen hat, muss die Gütergruppengliederung der IOT ebenfalls so angelegt sein, dass diese Themen mit abgedeckt werden.

- **Hybridisierung:** Für URMOD-3R werden, anders als in den üblichen IOT-Modellen, für die Verwendungsstrukturen sowohl monetäre als auch nicht monetäre Einheiten wie z. B. Tonnen, Tonnen Metallgehalt, Tonnen Rohöläquivalent oder Tonnenkilometer genutzt. Zweck der Hybridisierung ist es, die Präzision des Modells bei der Allokation der verwendeten Ressourcen auf die Güter der letzten Verwendung zu optimieren. Technisch gesehen beruht die Allokation der Ressourcen auf den Verwendungsstrukturen für die einzelnen Sektoren (Gütergruppen) der IOT. Die Genauigkeit des Modells bezüglich der Allokation der Ressourcen lässt sich insbesondere durch sektorale Disaggregation in Verbindung mit einer Hybridisierung verbessern.

Der Input von primären Rohstoffen und anderen Ressourcen in die Ökonomie wird nicht in monetären Einheiten gemessen, sondern vorzugsweise in Tonnen. Es kann deshalb grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass der Ressourcengehalt der Güter durch physische Verwendungsstrukturen besser repräsentiert wird als durch monetäre. Eine wichtige Voraussetzung ist allerdings ein hoher Grad an Homogenität der jeweiligen Gütergruppe. Im Falle von inhomogenen Gütergruppen kann davon ausgegangen werden, dass die monetären Werte die Ressourceninputs im Verlauf der Vorkette besser repräsentieren, insbesondere im Hinblick auf die Energieinputs, die sich im Gewicht des Gutes nicht niederschlagen, wohl aber in den Produktionskosten. In vielen Fällen kann eine

---

<sup>10</sup> Ein rein monetäres Modell mit niedriger sektoraler Auflösung (z. B. die Standard IOT der EU, die nach 64 Gütergruppen gegliedert ist), ermöglicht nur eine sehr grobe Allokation der Ressourcen (Schoer et al. 2018).

deutliche Verbesserung des Homogenitätsgrades durch gezielte Disaggregation erreicht werden. Die für eine detaillierte Disaggregation benötigten weltweit vergleichbaren Daten sind vorzugsweise in nicht-monetären Einheiten verfügbar. Insofern bedingen und ergänzen sich beide Maßnahmen.

Die Auswahl der Gütergruppen für die Disaggregation und die Hybridisierung bei URMOD-3R folgt deshalb einem selektiven Ansatz. Anhand der Kriterien Ressourcenrelevanz und Homogenität wurde Gütergruppe für Gütergruppe abgewogen, ob eine Hybridisierung zu einer Qualitätsverbesserung führt. Im Ergebnis werden in URMOD-3R etwa 70 % aller Gütergruppen in nicht-monetären Einheiten dargestellt.

URMOD-3R bildet das bisherige Ende einer längeren Kette von hybriden Modellen zur Schätzung von Rohstoffäquivalenten, angefangen mit dem RME Modell von Destatis (Schoer 2006; Buyny et al. 2009) über das Eurostat RME Modell (Schoer et al. 2012, 2024b) und den im Auftrag des UBA entwickelten Modellen des DeteRess- (Dittrich et al. 2018) und des RESCUE-Projektes (Purr et al. 2019).

- ▶ **Tiefe Untergliederung der letzten inländischen Verwendung:** In den standardmäßigen Input-Output-Tabellen (z. B. Eurostat) und den MRIO-Modellen wird die Matrix der letzten inländischen Verwendung (LIV) nur nach wenigen Endnachfragekategorien unterteilt. Im Gegensatz dazu wird die LIV-Matrix für URMOD-3R nach 57 Kategorien aufgegliedert. Eine tiefe Untergliederung ist aus zwei Gründen von Bedeutung: a) differenzierte Steuerungsparameter für die Szenario-Aufstellung und b) detaillierte Auswertungsmöglichkeiten.

Die Elemente der LIV-Matrix dienen als Steuerungsparameter für die Aufstellung der Szenarien. Erst durch die tiefe Untergliederung ist es möglich, z. B. detaillierte Annahmen zur Veränderung der Lebensstile oder detaillierte Annahmen zur Entwicklung der einzelnen Investitionsaufwendungen für die Schlüsseltechnologien zielgenau in das Szenario-Modell einzubringen.

Die differenzierte Gliederung ermöglicht es ebenfalls, den Ressourcenbedarf zu ermitteln, der durch einzelne Nachfrageaktivitäten ausgelöst wird. So werden beim Konsum verschiedene Handlungsfelder wie Wohnen, Ernährung, Gesundheit, Verkehr und Freizeit abgebildet. Bei der Ernährung werden tierische und nicht-tierische Lebensmittel unterschieden, beim Verwendungszweck Verkehr wird unterschieden nach den Antriebsarten (konventionell und elektrisch) beim Individualverkehr, sowie der Nachfrage nach Dienstleistungen des öffentlichen Verkehrs. Generell kann auch der Trend zur Tertiarisierung<sup>11</sup> der Konsumnachfrage, bei der Aufstellung der Szenarien detailliert betrachtet werden. Dies gilt auch mit Bezug auf die Investitionen. So kann zum Beispiel die Tendenz zu mehr wissensbasierten an Stelle von materialbasierten Investitionen modelliert werden.

- ▶ **Erweiterte Ressourcenmatrix:** Über die in anderen umweltökonomische IO Modellen üblichen Primärrohstoffe (Matrix der Primärrohstoffe) hinaus berücksichtigt die erweiterte URMOD-Ressourcenmatrix zusätzlich auch primäre erneuerbaren Energien, Sekundärrohstoffe und Sekundärenergien. Die Substitution von Primärrohstoffen mit Hilfe eines verstärkten Einsatzes von erneuerbaren Energien und Sekundärrohstoffen spiegelt sich bei den Standardmodellen lediglich indirekt in einer Abnahme des Primärrohstoffbedarfs wider. In URMOD-3R werden dagegen diese Faktoren explizit in der

---

<sup>11</sup> Tertiarisierung meint eine Erhöhung des Anteils von weniger rohstoffintensiven Dienstleistungen an den Konsumausgaben zu Lasten der Ausgaben für Waren.

Ressourcenmatrix berücksichtigt. Die Erweiterung der Ressourcenmatrix ermöglicht es, die Substitutionsprozesse von Primärrohstoffen unmittelbarer zu beobachten.

► **Weiterentwicklung des Ressourcenmodells aus dem RESCUE-Projekt:** URMOD-3R stellt eine Weiterentwicklung des Ressourcenmodells aus dem Vorläuferprojekt RESCUE des UBA dar (Purr et al. 2019). Beiden Modellen ist gemeinsam, dass es sich um sektorale tief gegliederte Szenario-Modelle handelt mit dem Schwerpunkt auf Analyse des Umbaus des Energiesystems und Nutzung von Sekundärressourcen. Die Szenario-Konstellationen beider Modelle sind weitgehend identisch. Bei der Aufstellung von URMOD-3R wurden im Wesentlichen folgende Merkmale des RESCUE Modells überarbeitet:

- a) Übergang zu einem voll integrierten multi-regionalen Weltmodell, das in der Lage ist, die Ergebnisse für Deutschland in einem Weltkontext darzustellen.
- b) Erweiterung und Optimierung der sektorale Gliederung.
- c) Überarbeitung und Verfeinerung der Szenario-Annahmen zu den Themen Umbau des Energiesystems und Nutzung von Sekundärressourcen.

#### 4.1.2 Berechnungsmethoden und Berechnungsgrundlagen

Dieser Abschnitt liefert einen Überblick über die grundlegenden Berechnungsmethoden und Datenquellen für die Aufstellung des URMOD-3R Basismodells für 2010. Eine detailliertere Beschreibung der Berechnungsmethoden und der Datengrundlagen findet sich in dem in Bearbeitung befindlichen ifeu paper zu URMOD-3R (Schoer et al. 2024a). Das Papier bietet ausführlichere Informationen zu den verwendeten Datenquellen für das Basismodell. Neben der Dokumentation der Datenquellen enthält das ifeu paper auch weitere technische Informationen zum Leontief Verfahren, den Berechnungsmethoden und der für das Modell entwickelten Klassifikationen (Gütergruppengliederung, Gliederung der Kategorien der letzten inländischen Verwendung, Gliederung der Ressourcenarten).

Mit dem Ziel, die vorhandenen statistischen Informationen monetärer und nicht-monetärer Art möglichst umfassend zu nutzen, wurde das URMOD IO-Modell in folgenden Arbeitsschritten erstellt:

1. Zusammenstellung nationaler monetärer Input-Output-Tabellen (IOTs)
2. Erstellung eines monetären Drei-Regionen-IO-Modells nach 182 Gütergruppen
3. Hybridisierung und weitere Disaggregation des Drei-Regionen-Modells nach 299 Gütergruppen

##### 4.1.2.1 Nationale monetäre Input-Output-Tabellen (IOT)

Den Ausgangspunkt bildet die Auswertung der monetären nationalen IOT. Aufgabe der IOT ist es, ausgehend von den in der Regel umfassenden wirtschaftsstatistischen Systemen des Landes, die Produktion und die Verwendung von Gütern in der Volkswirtschaft einschließlich der Außenhandelsbeziehungen für ein gegebenes Aggregationsniveau lückenlos abzubilden. Die IOT für Deutschland ist nach 72 Gütergruppen untergliedert. Die IOT für die EU enthält 64 Gütergruppen. Die monetäre IOT für die Region übrige Welt wurde aus dem multi-regionalen IOT-Modell der OECD (OECD ICIO) übernommen. Das OECD-Modell ist nach 36 Sektoren unterteilt.

##### 4.1.2.2 Monetäres drei-Regionen-IO Modell nach 182 Gütergruppen

Die sektorale Gliederung auf dieser Ausbaustufe entspricht derjenigen des Eurostat Models zur Schätzung des Rohstoffgehalts der Güter der letzten inländischen Verwendung (Eurostat RME-

Modell (Schoer et al. 2024b). Die Gliederung nach 182 Gütergruppen ist bereits weitgehend ausgerichtet auf das Ziel der Zurechnung der von der Volkswirtschaft verwendeten Rohstoffe und anderen Ressourcen auf die Güter der letzten inländischen Verwendung. Das entscheidende Kriterium für die Festlegung der Sektorengliederung war, rohstoffintensive bzw. ressourcenintensive Gütergruppen möglichst detailliert abzubilden, unter Berücksichtigung der Nebenbedingung der Datenverfügbarkeit für eine symmetrische Erweiterung der IOT. Bei der Festlegung der sektoralen Untergliederung für die Erweiterung der monetären IOT auf 182 Gütergruppen mussten folgende Elemente der Ausgangs IOT entsprechend disaggregiert werden: a) Importe und Exporte, b) Produktionswerte (Outputs) und c) Inputstrukturen.

- a) **Importe und Exporte:** Informationen für die Aufgliederung der Importe und Exporte können für die Waren (materielle Güter) aus der EU- und der UN-Außenhandelsstatistik (Comtrade 2023; Eurostat 2023a) unter Beachtung von bestimmten Konzeptunterschieden abgeleitet werden. Für die Untergliederung von Dienstleistungsbereichen kann die Zahlungsbilanzstatistik genutzt werden.
- b) **Outputs:** Für die Disaggregation der Output-Werte wurden für EU und Deutschland entsprechende Ergebnisse aus der Unternehmensstatistik und der Produktionsstatistik (Eurostat 2023b; c) unter Berücksichtigung der Konzeptunterschiede verwendet. Deutlich schwieriger ist die Datenlage hinsichtlich entsprechend tief gegliederter monetärer Angaben für die übrige Welt. Hier muss in vielen Fällen bei dem relativ detaillierten hohen Disaggregationsniveau hilfsweise auf Angaben in Tonnen, die aus unterschiedlichen Quellen stammen, zurückgegriffen werden. Die verfügbaren Ausgangsdaten in Tonnen wurden, für den speziellen Zwischenschritt der Aufstellung einer disaggregierten monetären IOT, näherungsweise, d. h. unter Vernachlässigung von Strukturunterschieden innerhalb der betrachteten Gütergruppen zwischen inländischer Produktion und Exporten, mit Preisinformationen der Außenhandelsstatistik (COMEXT, COMTRADE), welche für die einzelnen Gütergruppen jeweils Angaben in EUR und Tonnen nachweist, umgerechnet.
- c) **Inputstrukturen:** Für Deutschland stehen über die IOT hinausgehend umfangreiche monetäre Informationen für die Disaggregation der Inputstrukturen zur Verfügung. Hautquelle ist die sogenannte "Gütermatrix" (Güterverwendungstabelle) des Statistischen Bundesamtes. Die Gütermatrix für das Jahr 2010 liegt im Format ca. 2600 x 64 Gütergruppen vor. Somit steht mit der Gütermatrix im Grundsatz eine tiefen zeilenmäßige Disaggregation der IOT zu Verfügung. Die Matrix wurde als ein internes Abstimmungsinstrument der deutschen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen konzipiert. Diese Information wurde uns gegen Entgelt, Nachweis eines berechtigten Interesses und unter Einhaltung der Vorschriften zur statistischen Geheimhaltung zugänglich gemacht. Da das IOT-Konzept aber eine symmetrische Disaggregation erfordert, müssen auch die Spalten entsprechend untergliedert werden. Aus einer früheren Version der Gütermatrix für das Jahr 2010 lag ergänzend eine deutlich weitere Untergliederung der Spalten nach 120 Gütergruppen vor, die für die spaltenweise Erweiterung der Matrix genutzt werden konnte. Für eine Aufgliederung der Untermatrix der innerlandwirtschaftlichen Güterverflechtung für Deutschland nach 46 Gütergruppen für 2010 konnten wir die landwirtschaftliche Input-Output Tabelle des Thünen Instituts nutzen (Schmidt und Osterburg 2013). Für die Erweiterung der Spaltengliederung konnte außerdem die Wareneingangserhebung des Statistischen Bundesamtes nach knapp 250 Gütergruppen herangezogen werden (Destatis 2013). Mit Hilfe dieser Information, einigen weiteren partiellen Informationen, Annahmen und Analogieschlüssen war es möglich, die ursprüngliche monetäre IOT für Deutschland auf das Format 182 x 182 zu erweitern. Die Erweiterung erfolgte, ausgehend von der offiziellen monetären IOT, durch zellenweise Disaggregation. Mangels Verfügbarkeit hinreichend

geeigneter Information für die anderen Regionen wurden die so geschätzten disaggregierten Inputstrukturen (Produktionstechnologie) der deutschen IOT zellenweise auf die IOT der anderen beiden Regionen übertragen. Diese Information wurde genutzt, um bestimmte einzelne Zellen der originären IOT zu erweitern, unter Abstimmung auf die vorgegebenen Randsummen. Mit Hilfe eines iterativen Anpassungsverfahrens (RAS-Methode) wurden die aus der deutschen IOT übernommenen Informationen zur Inputstruktur für die zu erweiternden Zellen innerhalb einer Zelle jeweils an die zu disaggregierenden einzelnen Zellenwerte (Eckwerte) angepasst. Damit wird gewährleistet, dass die übergeordneten Input-Strukturen der originären IOT ebenfalls für die Regionen übrige EU und die übrige Welt erhalten bleiben.

#### 4.1.2.3 Hybrides drei-Regionen-IO Modell nach 299 Gütergruppen je Region

In einem letzten Schritt wurde das monetäre drei-Regionen Modell durch partielle Einfügung nicht-monetärer Verwendungsstrukturen hybridisiert und sektoral deutlich erweitert, und zwar sowohl hinsichtlich der Gütergruppengliederung als auch der Kategorien der letzten inländischen Verwendung (57 Kategorien je Region).

Für die Erweiterung des monetären Modells zu einem tief gegliederten hybriden Modell wurde eine große Menge an weit überwiegend nicht-monetären Daten in verschiedenen Darstellungseinheiten und aus unterschiedlichen Quellen zusammengeführt. Entsprechend der Vorgehensweise beim Aufbau der monetären Matrix werden Angaben zu Outputs, Importen und Exporten sowie Verwendungsstrukturen benötigt. Nachstehend werden die wichtigsten Quellen nach Themenbereichen kurz aufgelistet. Weitere Details zu den Datenquellen finden sich in dem bereits erwähnten und in Bearbeitung befindlichen ifeu paper.

- ▶ **Biomasse:** Produktion, erste Bearbeitung und Verwendung (Nahrungsmittelbilanzen) von Biomasseerzeugnissen (Erzeugnisse der Landwirtschaft, der Forstwirtschaft, der Fischerei, Holz und Papier). Zentrale Datenquelle ist die statistische Datenbank der Food and Agriculture Organization of the UN (FAOSTAT 2023). Als weitere Quellen wurden verwendet: Gesamtwirtschaftliche Rohstoffrechnungen (EW-MFA: inländische Entnahme (UNEP - International Resource Panel 2022)) sowie nationale Landwirtschaftsstatistiken, nationale Produktionsstatistiken und spezialisierte Studien.
- ▶ **Energieträger:** Produktion und Verwendung von Energieträgern. Die wichtigsten Quelle sind die Energiebilanzen der Internationalen Energieagentur (IEA 2023a) und Gesamtwirtschaftliche Rohstoffrechnungen (fossile Energieträger) (UNEP - International Resource Panel 2022).
- ▶ **Metalle:** Extraktion der Erze, erste Bearbeitung und Recycling, sonstige Verwendungsstruktur (Erze, Metallerzeugung, stoffliche Verwertung von Metallabfällen). Quellen: (USGS 2023a), (BGS 2023), EW-MFA (UNEP - International Resource Panel 2022), Fachvereinigungen, spezialisierte Studien, nationale Produktionsstatistiken.
- ▶ **Nicht-metallische Mineralien:** Extraktion von nicht-metallischen Mineralien, Glasindustrie, Baustoffe. Quellen: EW-MFA (inländische Entnahme), USGS, BGS und spezialisierte Studien, nationale Produktionsstatistiken.
- ▶ **Materialintensive Industrieaktivitäten der weiteren Bearbeitung:** Chemische Industrie, Fahrzeugbau und weite Produktionsaktivitäten der Metallverarbeitenden Industrie.
  - Die Chemische Industrie wurde bereits auf der Ebene des monetären Models, basierend auf der Gütermatrix für Deutschland, nach neun Gütergruppen untergliedert. Aber

wegen weiterhin bestehender beträchtlicher Inhomogenitäten in den meisten Untergruppen konnten nur die Sektoren Herstellung von Plastik in Primärform und Biokraftstoffe auch zusätzlich hybridisiert werden.

- Der Bereich Herstellung von Metallerzeugnissen liegt ebenfalls bereits in der monetären Tabelle in einer Gliederung nach 7 Gütergruppen vor. Eine Hybridisierung war aber wegen der weiterhin bestehenden Inhomogenitäten innerhalb der Untergruppen nicht sinnvoll.
- Die Bereiche Computer, Elektronik, elektrische Ausrüstungen und Maschinenbau sind sehr heterogen. Bei diesen Gütergruppen würde deshalb eine Disaggregation und eine Hybridisierung keine Vorteile erbringen. Hier wurden deshalb nur einige kleinere Unterbereiche, die Teile für den Bau von Anlagen der Schlüsseltechnologien zuliefern (Halbleiter für Solarpanele, Batterien für Elektrofahrzeuge, Windturbinen und Wärmepumpen), ausgeliert und hybridisiert.
- Die vergleichsweise materialintensive Produktionsaktivität Bau von Straßenfahrzeugen wurde deutlich aufgegliedert und vollständig hybridisiert. Durch eine Untergliederung nach Fahrzeugtypen kann näherungsweise eine Homogenisierung erreicht werden. Diese Gütergruppe wurde deshalb nach neun Kategorien gegliedert und in die Einheit Tonnen umgerechnet. Für die Ableitung dieser Angaben für die IOT wurde ein Schätzmodell erstellt, das eine Vielzahl von Datenquellen zusammenführt, die sich regional, fachlich und hinsichtlich der Darstellungseinheit (EUR oder US\$, Tonnen, Stück, Gewicht je Tonne, Preis je Tonne, Gewicht je Stück) unterscheiden. Das Kernstück dieses Datenkörpers bildet die Statistik der International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA 2023), welche die weltweite Produktion von Straßenfahrzeugen nach Fahrzeugtypen in der Einheit Stück nachweist.
- Folgende **Materialintensive Dienstleistungsaktivitäten** wurden weiter unterteilt:
  - Die energieintensiven Transportdienstleistungen wurden nach 19 Gütergruppen untergliedert. Die Leistungen werden in den nicht-monetären Einheiten Personenkilometer bzw. Tonnenkilometer gemessen. Für die Ableitung dieser Angaben für die IOT wurde ein Schätzmodell erstellt, das eine Vielzahl von Datenquellen zu unterschiedlichen Transportaktivitäten und den Energieintensitäten zusammenführt. Wichtigste Quelle für die weltweite Ermittlung der Transportleistungen ist die OECD Transportstatistik (OECD 2023a).
  - Die Bauleistungen sind materialintensiv insbesondere im Hinblick auf nicht-metallische Mineralien. Die Bauproduktion wird nach 29 Gütergruppen untergliedert. Ausgangspunkt sind die drei Gütergruppen für die Bauaktivitäten der monetären IOT. Die tiefe Untergliederung wird benötigt sowohl für die detaillierte Betrachtung der Materialinputs in die Bauindustrie generell als auch für die spezielle Beobachtung des Materialbedarfs der Investitionen für Schlüsselinvestitionen. Für die Disaggregation der Bauaktivitäten wurde ebenfalls ein Schätzmodell entwickelt, das eine große Zahl von nationalen und internationalen Quellen zusammenführt. Den Ausgangspunkt bilden die tief gegliederten Ergebnisse für Deutschland aus dem Vorläuferprojekt RESCUE. Diese Angaben beruhen auf der Gütermatrix des statistischen Bundesamtes sowie auf einer Reihe von speziellen Studien zum Materialbedarf der einzelnen Bauaktivitäten.

- ▶ **Importe und Exporte:** Als Datenquelle dienen die sehr tief nach Gütergruppen untergliederten Außenhandelsstatistiken COMEXT und COMTRADE (Tonnen und Euro). Die Zahlungsbilanzstatistik (Eurostat 2023d) (in Euro) wird als Datenquelle für Disaggregation der Importe und Exporte von Dienstleistungen genutzt.
- ▶ **Disaggregation der Matrix der letzten inländischen Verwendung:** Die Verfahrensweisen für die Untergliederung der Konsum- und der Investitionsmatrix sind unterschiedlich.
  - Die Disaggregation der Konsummatrix beruht auf zwei Quellen: In mehrjährigen Abständen wird die IOT für Deutschland mit einer disaggregierten Konsummatrix veröffentlicht, die kompatibel ist mit dem IOT-Konzept<sup>12</sup>. Außerdem veröffentlicht die Weltbank im Rahmen des IPC-Projektes international vergleichbare Strukturen der Ausgaben für Konsumstrukturen (World Bank Group 2020). Für die Zwecke dieses Projektes wurden durch eine Kombination der Informationen der Weltbank mit den Strukturinformationen aus der erweiterten Konsummatrix für Deutschland für alle drei Regionen Konsummatrizen gemäß dem IOT-Konzept generiert (Basisjahr 2010).
  - Bezuglich der **Investitionen** weist die Ausgangs-IOT nur zwei zusammengefasste Investitionskategorien nach, nämlich Ausrüstungen und Bauten einerseits, sowie Vorratsveränderungen andererseits. Da die Vektoren für zusammengefasste Kategorien aber aufgrund der tiefen Gliederung der IOT nach 299 Gütergruppen untergliedert sind, ist es bei den Investitionen im Regelfall möglich, eine eindeutige Zuordnung der Gütergruppen zu den einzelnen Investitionskategorien vorzunehmen. In Einzelfällen, die aber quantitativ nicht bedeutsam sind, wurde die Informationslücke durch Schätzungen überbrückt.

## 4.2 Szenario-Modell für die Jahre 2030, 2040 und 2050

### 4.2.1 Konzept Szenario-Modell

**Szenarien:** Für die Zwecke dieses Projektes werden drei Szenarien, GreenSupreme, GreenLate und das H<sub>2</sub>-Szenario, jeweils für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 aufgestellt. Die Konzepte für GreenSupreme und GreenLate wurden aus dem RESCUE Projekt für Deutschland übernommen. Für die Transformation in der EU ohne DE und der Welt ohne EU wurde auf die 1,5°- und 2°-Szenarien von (Teske et al. 2019) zurückgegriffen. Das Ambitionsniveau von GreenSupreme und des H<sub>2</sub>-Szenarios entspricht in etwa dem 1,5° Ziel von Teske, während GreenLate dem 2° Ziel entspricht.

- ▶ GreenSupreme beschreibt einen Pfad mit sehr weitgehenden technisch möglichen Änderungen und gleichzeitig sehr deutlichen Änderungen des Konsumverhaltens der Menschen unter Berücksichtigung einer sehr schnellen Transformation.
- ▶ GreenLate unterstellt eine langsame Transformation des Energiesystems, mit der im Jahr 2050 gerade eben eine Treibhausgasneutralität erreicht werden kann.
- ▶ Beim H<sub>2</sub>-Szenario handelt es sich um eines der drei Hauptzzenarien (TN-H<sub>2</sub> G Szenario) der sogenannten Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, die durch ein Konsortium aus Fraunhofer ISI, consentec, ifeu und TU Berlin im Auftrag des

---

<sup>12</sup> Hier wurde auf die Konsumverflechtungstabelle der IOT für Deutschland für das Jahr 2004 (Destatis 2009) und 2015 (Destatis 2019) zurückgegriffen.

Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie erstellt wurden. Das Szenario analysiert u. a. die Auswirkungen eines sehr starken Einsatzes von Wasserstoff im Energiesystem.

Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 3 „Überblick über die Szenarien“.

**URMOD-3R Szenario-Modell:** Bei dem Szenario-Modell handelt es sich grundsätzlich um eine Variante des Basismodells für 2010. Mit Bezug auf die Allokation der Ressourceninputs auf die Güter der letzten inländischen Verwendung mit Hilfe des Leontief Verfahrens stimmen beide Modelle überein. Wie in Abbildung 1 (Kapitel 4.1) dargestellt, beruht das Verfahren auf der Verknüpfung der drei grundlegenden Elemente Matrix der Güterinputkoeffizienten, Matrix der letzten inländischen Verwendung und Matrix der Ressourceninputkoeffizienten.

Der Unterschied zwischen den beiden Varianten besteht darin, dass die Matrizen des Basismodells auf erhobenen Daten beruhen, während die Matrizen für das Szenario-Modell mit Hilfe von möglichst fundierten Annahmen durch Fortschreibung des Basismodells generiert werden. Die Szenario-Annahmen werden auf die Einzelelemente der Güterinputkoeffizienten-Matrix und der Matrix der letzten inländischen Verwendung durch die Variation der einzelnen Steuerungsparameter (insgesamt knapp eine Million Einzelelemente) übertragen.

## 4.2.2 Ableitung der Szenario-Annahmen

Für die Szenarien werden die zahlreichen Annahmen zu den Schlüsseltechnologien und zum technischen Hintergrundsystem (siehe Teilbericht Umweltwirkungen (Dittrich et al. 2024b)) sowie zu Bevölkerung, Ernährung und Wirtschaftswachstum (siehe nachfolgend) so aufbereitet, dass sie als Veränderung der Inputkoeffizienten oder als Veränderung der Endnachfrage in das Modell einfließen können. Das Modell berechnet die dadurch erzeugten Veränderungen bei den Produktionsmengen und dem kumulierten Ressourcenbedarf. Ergänzend werden auch Annahmen aus dem RESCUE Modell genutzt.

### 4.2.2.1 Matrix der letzten inländischen Verwendung (LIV)

Die Ableitung der Steuerungsparameter ist unterschiedlich für die LIV und für die Matrix der Güterinputkoeffizienten (Technologie-Matrix). Bei der Schätzung der LIV-Matrix, die weiterhin nach Konsum- und Investitionsmatrix zu differenzieren ist, wurde nach zwei grundsätzlichen Einflussfaktoren unterschieden, dem Skalen- und dem Struktureffekt.

#### 4.2.2.1.1 Skaleneffekt

Zur Ableitung des Skaleneffekts wird die angenommene Entwicklung des Bruttoinlandprodukts (BIP) für den jeweils betrachteten Zeitraum zugrunde gelegt.<sup>13</sup> Es wurden folgende Annahmen für das BIP-Wachstum verwendet: Für Deutschland wird analog zu RESCUE in GreenSupreme und im H<sub>2</sub>-Szenario eine abnehmende Wachstumsrate ab 2023 und ein Nullwachstum<sup>14</sup> ab 2030 angenommen und für GreenLate ein jährliches BIP-Wachstum von 0,7 % pro Jahr.

Für die beiden weiteren Regionen wurde die Vorgehensweise aus (Teske et al. 2019) übernommen, deren Annahmen auf dem IEA World Energy Outlook (2016) beruhen. Auch hier wurde entschieden, die aktuelle Version zu verwenden (IEA 2022). Für die Periode bis 2022 wurden die kaufkraftbereinigten Wachstumsraten der Weltbank (World Bank 2023) verwendet.

---

<sup>13</sup> Bezuglich des Skaleneffektes ist grundsätzlich zu berücksichtigen, dass die zugrunde gelegte Entwicklung des preisbereinigten BIP nicht nur Mengenänderungen abbildet, sondern auch Qualitätsänderungen einbezieht, die zumindest teilweise nicht rohstoffrelevant sein dürften. Allerdings ist die Datenlage für eine solide Abschätzung dieses Effektes nicht hinreichend (Moulton und Moses 1997). Im RESCUE-Modell wurden dennoch grob geschätzte Abschläge berücksichtigt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden entsprechende pauschale Abschläge für die anderen beiden Regionen in den Struktureffekt eingebaut.

<sup>14</sup> Bis 2022 wurden Realdaten genutzt. Es handelt sich um ein Netto-Nullwachstum.

Die Annahmen für EU ohne DE und Welt ohne EU gelten für alle Szenarien und beschreiben die Veränderungsrate von einer Periode zur nächsten.

**Tabelle 1: Annahmen zu den jährlichen durchschnittlichen Wachstumsraten**

	2010-2022	2023-2030	2031-2040	2041-2050
<b>DE GreenSupreme, H<sub>2</sub></b>	1,33%	0,35%	0,00%	0,00%
<b>DE GreenLate</b>	1,33%	0,70%	0,70%	0,70%
<b>EU ohne DE</b>	1,49%	1,90%	1,20%	1,20%
<b>Welt ohne EU</b>	3,39%	3,30%	2,60%	2,60%

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf (World Bank 2023) für den Zeitraum von 2010-2022, sowie (IEA 2022) und (Dittrich et al. 2020c) für den Zeitraum von 2023-2050.

Aufgrund dieser Vorgaben zu den jährlichen Wachstumsraten ergeben sich für die einzelnen Szenarien und Szenario-Zeiträume folgende Entwicklungen:

**Tabelle 2: Veränderung des BIP gegenüber 2010 (2010 = 1)**

	2030	2040	2050
<b>DE GreenSupreme, H<sub>2</sub></b>	1,20	1,20	1,20
<b>DE GreenLate</b>	1,17	1,24	1,33
<b>EU ohne DE</b>	1,43	1,66	1,91
<b>Welt ohne EU</b>	2,07	2,73	3,58

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf (World Bank 2023) für den Zeitraum von 2010-2022, sowie (IEA 2022) und (Dittrich et al. 2020c) für den Zeitraum von 2023-2050.

#### 4.2.2.1.2 Struktureffekt

Der Struktureffekt setzt sich aus zwei unterschiedlichen Elementen zusammen: a) Annahmen zur generellen Veränderung der Struktur der Konsum- und Investitionskategorien und b) spezielle Annahmen zu einzelnen Endnachfragekategorien, einschließlich Annahmen über die Güterzusammensetzung.

##### Konsummatrix generelle Annahmen

Bei der Schätzung genereller Strukturverschiebungen zwischen den Kategorien der Konsummatrix wurden die Annahmen für Deutschland unmittelbar aus dem RESCUE-Projekt übernommen. Für die anderen beiden Regionen wurden Schätzungen für die künftig zu erwartenden Strukturänderungen nach Kategorien des Konsums aus der Vergangenheitsentwicklung abgeleitet. Als Datengrundlage für die Schätzung wurden Ergebnisse der EU Statistik (Eurostat 2023e) für den Zeitraum 1995 bis 2019 zugrunde gelegt. Die Daten zeigen, nicht unerwartet, insbesondere eine Tendenz zur „Tertiarisierung“ der Konsumausgaben, d.h. eine Erhöhung des Anteils von weniger rohstoffintensiven Dienstleistungen an den Konsumausgaben zu Lasten der Ausgaben für Waren. Mangels hinreichend tief gegliederter Informationen für die übrige Welt wurden die Tendenzen für die EU auch auf diese Region übertragen.

### Konsummatrix spezielle Annahmen

Für folgende Konsumkategorien wurden spezielle Annahmen verwendet, welche die obigen Annahmen zum Struktureffekt ersetzen: a) Nachfrage nach Nahrungsmitteln, b) direkter Energieverbrauch der Haushalte, c) Nachfrage der Haushalte nach Transportdienstleistungen.

- a) **Konsummatrix Nahrungsmittel:** Abweichend von der generellen Vorgehensweise wurde bei der Entwicklung der Nachfrage nach Nahrungsmitteln für alle drei Regionen als Indikator die unterstellte Bevölkerungsentwicklung zugrunde gelegt.

Für Deutschland wurden die Annahmen aus RESCUE aktualisiert. Analog zum Vorgehen aus RESCUE (Dittrich et al. 2020b) wurde die Bevölkerungsvorausberechnung, Variante 1 (Moderate Entwicklung bei niedrigem Wanderungssaldo) des Statistischen Bundesamts verwendet, allerdings in der aktuellen Version.

Für die beiden anderen Regionen wurde auf die aktuelle Bevölkerungsprognose der UN von 2022 zurückgegriffen („Medium fertility variant“). Für 2050 wird darin eine Weltbevölkerung von 9,69 Milliarden angenommen. Die Annahmen gelten für alle Szenarien.

**Tabelle 3: Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung**

	2010	2030	2040	2050
<b>DE</b>	81.283	82.820	81.297	79.064
<b>EU ohne DE</b>	419.497	428.882	424.214	415.026
<b>Welt ohne EU</b>	6.441.171	8.000.021	8.653.236	9.193.350

Quelle: Eigene Berechnung basierend auf (Destatis 2022) für Deutschland und (UN 2022) für die beiden anderen Regionen.

Darüber hinaus wurde beim Konsum von Nahrungsmitteln angenommen, dass der relative Anteil tierischer Nahrungsmittel sich zugunsten pflanzlicher Nahrungsmittel vermindert. Als Grundlage für die Annahmen zur Entwicklung der pflanzlichen und tierischen Ernährungsmuster diente die EAT-Lancet Studie (EAT-Lancet Commission 2019). Die Zielwerte der EAT Lancet Studie wurden dabei für alle Regionen und Szenarien genutzt. Der optimale Anteil der tierischen Nahrungsmittel liegt laut EAT-Lancet bei 11 % (ohne Fisch); folglich sind 89 % pflanzlich basiert. Diese Anteile werden für 2050 als Zielwerte genutzt und ausgehend vom Basisjahr wurden die Anteile linear angepasst, bis das Zielverhältnis erreicht ist. Die ursprüngliche Annahme aus dem RESCUE Projekt für Deutschland (25 % tierische Nahrungsmittel) wurde an die Vorgabe aus EAT-Lancet angepasst.

- b) **Direkter Energieverbrauch der Haushalte:** Die Berechnung der direkten Energieverbräuche der Haushalte wurde im Rahmen der Aufstellung der Energiestromtabellen (s. u.) durchgeführt. Grundlage hierfür sind die jeweiligen Energiedaten der Szenario-Modellierungen. In den Szenarien GreenSupreme und GreenLate konnte für Deutschland auf die detaillierten Ergebnisse des Modellierungsansatzes SCOPE<sup>15</sup> im Rahmen des RESCUE-Projekts (Purr et al. 2019) zurückgegriffen werden. Die Modellierungsergebnisse aus RESCUE wurden hierbei an die kleinteilige Gliederung der betrachteten Technologien in REFINE angepasst. Für Deutschland im H<sub>2</sub>-Szenario (Sensfuß et al. 2021), sowie die Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU (Teske et al. 2019) lagen ebenfalls entsprechende Hintergrunddaten zum Energieverbrauch vor.

<sup>15</sup> Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems, eine ausführliche Beschreibung des Modells ist in (Dittrich et al. 2020b) zu finden.

- c) **Nachfrage der Haushalte nach Transportleistungen:** Für die Verkehrsleistungen in Deutschland im H<sub>2</sub>-Szenario wurden Daten aus den Langfristszenarien (Kral et al. 2021) verwendet und auf die Klassifikation von URMOD-3R übertragen. Für die anderen beiden Szenarien und Regionen wurde nach der oben beschriebenen generellen Vorgehensweise vorgegangen.

### **Investitionsmatrix generell**

Bei der Schätzung der generellen Strukturverschiebungen zwischen den Kategorien der Investitionsmatrix wurden, entsprechend der Vorgehensweise bei der Konsummatrix, die Annahmen für Deutschland unmittelbar aus dem RESCUE-Projekt übernommen. Für die anderen beiden Regionen wurden Schätzungen für die künftig zu erwartenden Strukturänderungen aus der Vergangenheitsentwicklung abgeleitet. Als Datengrundlage für die Schätzung für die Region EU wurden Ergebnisse der EU Statistik (Eurostat 2023f) für den Zeitraum 2000 bis 2020 genutzt. Für die Welt ohne EU wurden Ergebnisse der Statistik der OECD (OECD 2023b) herangezogen. Im Falle von Datenlücken wurden hilfsweise auch Relationen aus der EU Statistik verwendet. Insbesondere bei den Investitionen für Ausrüstungen und sonstige Anlagen ist eine klare Tendenz erkennbar: der Anteil wissensbasierter Investitionen (z. B. IKT, intellektuelles Eigentum) steigt zu Lasten eher materialbasierter Investitionen.

### **Investitionsmatrix spezielle Annahmen**

Vorgaben für die Entwicklung der Investitionen in „Schlüsseltechnologien für die Energiewende“ konnten aufgrund der zu erwartenden dynamischen Entwicklung nicht in Anlehnung an die Vergangenheitsentwicklung abgeleitet werden. Deshalb wurde hier folgendermaßen vorgegangen: Für die betrachteten Schlüsseltechnologien wurden für alle Szenarien und Regionen die in den Stützjahren installierten Kapazitäten auf Basis der Annahmen in den Szenarien (RESCUE, H<sub>2</sub>-Langfristszenario, 1,5° und 2°-Szenario, vgl. Kap. 3) ermittelt. Die Investitionen in die Schlüsseltechnologien wurden anschließend unter Einbezug der jeweiligen Anlagenlebensdauer so bestimmt, dass die benötigten Kapazitäten bis zum darauffolgenden Stützjahr erreicht werden. Dabei wurde der Zubau als auch das Ersetzen der Anlagen für alle Regionen inkrementell auf die 10 Jahre zwischen den Stützjahren verteilt. Detaillierte technische Parameter wie etwa die angenommenen Lebensdauern der Anlagen und Vollaststunden etc. sind im Teilbericht Umweltwirkungen (Dittrich et al. 2024b) dokumentiert.

Die Berücksichtigung der generellen und speziellen Strukturänderungen führt sowohl bei der Konsum- als auch bei der Investitionsmatrix dazu, dass die Vorgaben des alleinigen Skaleneffektes zum Ressourcenegehalt der Investitionen deutlich unterschritten werden.

#### **4.2.2.2 Matrix der Güterinputkoeffizienten**

Wie bereits erwähnt, bildet die Güterinputkoeffizienten-Matrix die Produktionstechnologie (Intensitätseffekt) ab. Diese Matrix wird für die Szenario-Jahre, ausgehend vom Basisjahr 2010, mit Hilfe von Annahmen fortgeschrieben.

In einem ersten Schritt wurde die Entwicklung aller Inputkoeffizienten gemäß RESCUE auf REFINE übertragen. Für die beiden Themenbereiche Energie und Nutzung von Sekundärmaterialien wurde für dieses Projekt eine weitgehende Neubewertung der Annahmen durchgeführt. Wie die dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, haben die Substitution fossiler Energieträger durch primäre erneuerbare Energien und die verstärkte Nutzung von Sekundärressourcen den mit Abstand größten Einfluss auf die Entwicklung der Ressourcenintensität.

Die Vorgaben für die Technologieentwicklung in den übrigen Bereichen wurden in enger Anlehnung an die Annahmen für das RESCUE Projekt determiniert.

#### **4.2.2.2.1 Übernahme der Annahmen aus dem RESCUE Modell**

Bei der Übernahme der Szenario-Annahmen zur Produktionstechnologie aus dem RESCUE-Modell wurde folgendermaßen vorgegangen:

- a) Umschlüsselung der Inputkoeffizienten-Matrizen für DE aus dem RESCUE-Projekt auf die Gütergruppengliederung des REFINE-Projektes.
- b) Ausgehend von a), Berechnung der Veränderung der einzelnen Koeffizienten für DE zwischen dem Basisjahr 2010 und dem jeweiligen Szenario-Jahr für RESCUE in der REFINE-Gütergruppengliederung.
- c) Schätzung der Inputkoeffizienten der Szenario-Jahre für alle drei Regionen durch Multiplikation der Koeffizienten des Basisjahres 2010 mit b). Dies bedeutet, dass die Entwicklung der Produktionstechnologie für DE laut REFINE auf jeweils alle drei Regionen übertragen wurde.

#### **4.2.2.2 Neuberechnung der Energiekoeffizienten**

Die Grundlage für die Berechnung der Energiekoeffizienten stellen Energiestrom- und Energieverflechtungstabellen dar. Die Energiestromtabellen zeigen den Energieverbrauch nach Energieträgern bzw. Technologien pro Stützjahr und Region, aufgeteilt auf energieverbrauchende Sektoren, wie Produktionsaktivitäten und Haushalte. In den Szenarien GreenSupreme und GreenLate konnte hier für Deutschland auf die detaillierten Ergebnisse des Modellierungsansatzes SCOPE (Dittrich et al. 2020b) im Rahmen des RESCUE-Projekts zurückgegriffen werden. Die RESCUE-Modellierung wurde hierbei an die tiefere Untergliederung der betrachteten Technologien in REFINE angepasst. Für Deutschland im H<sub>2</sub>-Szenario (Sensfuß et al. 2021) sowie die Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU wurden ebenfalls die entsprechenden Hintergrunddaten zum Energiesystem verwendet (Teske et al. 2019). Da die Hintergrunddaten hier nicht im benötigten Detailgrad der SCOPE-Modellierung vorlagen, musste bei der Aufteilung der Energiebedarfe einzelner Sektoren auf entsprechende Untersektoren teilweise auf Daten aus den Energiestromtabellen Deutschlands aus den Green-Szenarien zurückgegriffen werden. Dabei wurden die Anteile des Energieverbrauchs eines Untersektors am gesamten Energieverbrauch des Sektors aus Deutschland in GreenSupreme bzw. GreenLate für das H<sub>s</sub>-Szenario und die Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU übernommen.

Die Energieverflechtungstabelle bildet den Bedarf an Energie und energiebezogenen Vorprodukten des Energiesektors für eine Region und ein Stützjahr ab. Hierfür konnten für viele Energiesektoren Angaben aus den Energiestromtabellen abgeleitet werden. Für Angaben der PtX-Technologiegruppe wurde zusätzlich auf Daten des Projekts SYSEET (Liebich et al. 2020) zurückgegriffen, um die für die Produktion von PtX-Produkten benötigten Mengen an Strom, Wasser aus Meerwasserentsalzungsanlagen, CO<sub>2</sub> aus Direct Air Capture (DAC) oder Wasserstoff zu berechnen.

Die Angaben aus der Energiestrom- und der Energieverflechtungstabelle wurden zur Ableitung von Energieinputkoeffizienten für alle Gütergruppen genutzt.

Die Energieverflechtungstabelle enthält energiebezogene Inputkoeffizienten, die unmittelbar in das Modell übernommen wurden. Dagegen liefert die Energiestromtabelle absolute Angaben zu den Energieinputs für alle Produktionsaktivitäten, die URMOD-3R nicht unmittelbar verarbeiten

kann. Deshalb wurden Angaben dieser Tabelle in einem mehrschrittigen Rechenverfahren in Inputkoeffizienten umgerechnet.

#### **4.2.2.2.3 Neuberechnung Recycling Metalle und sonstige Materialien**

Im Projekt RESCUE waren die Anteile der Sekundärmetalle in der Produktion exogen vorgegeben. Die Ergebnisse zeigten, dass die erforderlichen Schrottmengen teilweise nicht oder nicht sicher zur Verfügung stehen. Daher wurden in REFINE die Sekundäranteile von zehn Metallen im Rahmen von Kurz- und Vertiefungsstudien überprüft und die Annahmen angepasst. Die zehn Metalle umfassen Eisen, Kupfer, Aluminium, Zink, Nickel, Lithium, Gold, Blei, Silber und Platin.

Die Überprüfung von Sekundäranteilen und die Ableitung begründeter Neuvorschläge für die zehn Metalle ist im Grundsatz nach folgendem methodischen Vorgehen durchgeführt worden:

- ▶ Abschätzung der zukünftigen Gesamtnachfrage nach den Metallen.
- ▶ Abschätzung der Menge der Sekundärrohstoffe, die nach der Nutzungsphase unter Berücksichtigung von Verlusten wieder zur Verfügung stehen.
- ▶ Berechnung der möglichen Anteile der Sekundärrohstoffe in der Produktion.
- ▶ Auswahl der Annahmen für die Basisszenarien und Vorschlag von Annahmen für die Sensitivität „Variation der RC-Werte“ (siehe Kapitel 4.2.2.2.4)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Kurz- und Vertiefungsstudien in Tabelle 4 zusammenfassend für das GreenSupreme Szenario dargestellt. Die Ergebnisse für GreenLate und das H<sub>2</sub>-Szenario sind der Tabelle 58 (in Anhang C) zu entnehmen.

**Tabelle 4: Zusammenfassung der für REFINE angenommenen Sekundäranteile der untersuchten Metalle für alle Regionen und Jahre in GreenSupreme**

Material	Jahr	DE	RoE	RoW
Eisen/Stahl	2010	42 %	52 %	24 %
	2030	63 %	63 %	41 %
	2040	67 %	67 %	53 %
	2050	75 %	75 %	59 %
Aluminium	2010	38 %	70 %	47 %
	2030	67 %	67 %	45 %
	2040	59 %	59 %	58 %
	2050	66 %	66 %	65 %
Kupfer	2010	30 %	26 %	17 %
	2030	49 %	49 %	36 %
	2040	51 %	51 %	45 %
	2050	59 %	59 %	51 %
Blei	2010	69 %	77 %	53 %
	2030	78 %	78 %	78 %
	2040	88 %	88 %	88 %
	2050	95 %	95 %	95 %
Zink	2010	13 %	12 %	5 %
	2030	45 %	45 %	45 %
	2040	64 %	64 %	64 %
	2050	82 %	82 %	82 %
Nickel	2010	30 %	30 %	30 %
	2030	38 %	38 %	35 %
	2040	75 %	75 %	52 %
	2050	95 %	95 %	76 %
Lithium	2010	0 %	0 %	0 %
	2030	15 %	15 %	15 %
	2040	55 %	55 %	30 %

Material	Jahr	DE	RoE	RoW
Gold	2050	70 %	70 %	54 %
	2010	12 %	12 %	12 %
	2030	31 %	31 %	31 %
	2040	48 %	48 %	48 %
	2050	42 %	42 %	42 %
Silber	2010	19 %	19 %	21 %
	2030	45 %	45 %	42 %
	2040	48 %	48 %	44 %
	2050	50 %	50 %	43 %
Platin	2010	11 %	11 %	24 %
	2030	50 %	50 %	46 %
	2040	75 %	75 %	28 %
	2050	95 %	95 %	19 %

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der RESCUE-Studien

Die festgelegten Sekundäranteile stellen mitunter theoretisch maximale Potenziale basierend auf verfügbaren Sekundärmaterialmengen dar. Sie bieten damit die Möglichkeit eine sehr ambitionierte Umsetzung zirkulären Wirtschaftens in den Szenarien zu berücksichtigen. Der Einfluss des hohen Ambitionsgrades auf den mit dem IOT-Modell ermittelten Rohstoffkonsum wird in einer Sensitivität geprüft (siehe Kapitel 4.2.2.2.4 und Kapitel 5.6).

RC-Quoten zu Kunststoffen wurden auf Basis einer ausführlichen Recherche über aktuelle Entwicklungen politischer Ziele in Deutschland und Europa sowie politischer Ziele im Rest der Welt getroffen (siehe Boxen).

#### Politische Ziele in Deutschland und der EU

Zielformulierungen finden sich unter anderem in der Kunststoffstrategie (European Commission 2018), die z. B. festschreibt, dass bis 2025 insgesamt 10 Mio. t an rezyklierten Kunststoffen in neue Produkte auf dem EU-Markt Eingang finden müssen oder im *Circular Economy Action Plan* (European Commission 2020a). Konkrete Vorschläge für das Recycling und für den Recyclinganteil finden sich vor allem für Verpackungen bzw. Kunststoffprodukte. Im Vorschlag der Kommission zur Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle ist folgendes vorgesehen (European Commission 2020b, 2022):

- ▶ Ein Anteil von aus post-consumer Kunststoffabfällen rezyklierten Kunststoffen in Kunststoffverpackungen ab dem 1. Januar 2030 von mindestens 30 % für PET und 10 % für andere Kunststoffe (außer Einweggetränkeflaschen) bei kontaktempfindlichen Verpackungen (z. B. für Lebensmittel, Tierfutter), von 30 % bei Einweggetränkeflaschen aus Kunststoff und mindestens 35 % für alle anderen Kunststoffverpackungen;

- und ab dem 1. Januar 2040 ein Mindestanteil von 50 % für kontaktempfindliche Kunststoffverpackungen, die mehrfach genutzt werden, und von 65 % für kontaktempfindliche Einweggetränkeflaschen aus Kunststoff; für alle anderen Kunststoffverpackungen soll der Mindestanteil 65 % betragen.

Neben Verpackungen werden beispielsweise Mindestrezyklatgehalte von synthetischen Stoffen für Bekleidung und andere Textilien (z. B. mindestens 20 % Nylon, das aus Produktions- und/oder Verbraucherabfällen zurückgewonnen wurde) oder auch für elektronische Displays (z. B.: Produkte mit einem Mindestanteil von 10 % Post-Consumer-Recyclingkunststoffen) festgeschrieben (European Commission 2023a). Darüber hinaus beziehen sich Regulierungen und Vorschläge in der EU selten auf andere relevante Sektoren wie die Bau-, Automobil- oder Elektronikbranche (Science Media Center Germany 2022).

### Politische Ziele global

Es gibt bislang keine globale Vereinbarung, die eine Mindestrecyclingquote oder sogar einen Mindestanteil für rezyklierte Kunststoffe in Kunststoffprodukten vorsieht. Gegenwärtig werden weltweit nur rund 9 % der Kunststoffabfälle rezykliert (OECD 2022). In einer Vielzahl von Ländern legen die Regierungen Recyclingquoten fest und fördern Recyclinginfrastrukturen. In einigen gibt es inzwischen auch Vorgaben oder Selbstverpflichtungen der Industrie zum Recycling-Inhalt in Kunststoffprodukten (EoL-RIR), z. B.:

- USA: Die chemische Industrie will ab 2030 alle Kunststoffverpackungen mit einem Anteil von mindestens 30 % rezyklierten Kunststoffen produzieren (American Chemistry Council 2021).
- Chile: Einwegplastikflaschen sollen bis 2025 zu 25 % aus recyceltem Material bestehen, bis 2030 sogar zu 50 % und bis 2050 zu 70 % (Alomar 2020).
- Indien: Verpflichtende Rezyklatanteile in Kunststoffprodukten für drei Kunststoffkategorien werden unterschieden (für 2030): 60 % (Kategorie I), 20 % (Kategorie II) und 10 % (Kategorie III) (Yamanouchi 2022).<sup>16</sup>

Es wurde unterstellt, dass die gegenwärtig diskutierten Vorschläge für die EU in GreenLate erfüllt und in GreenSupreme bzw. im H<sub>2</sub>-Szenario übertroffen werden. Der Anstieg über die Jahre erfolgt linear, wobei unterstellt wird, dass die Technologien und die Kapazitäten in den kommenden Jahren weltweit zunehmen werden.

Für die Rezyklatanteile für Kunststoffe für Deutschland und die EU bzw. für den Rest der Welt wurden schließlich folgende Anteile vorgeschlagen und festgelegt:

**Tabelle 5: Zusammenfassung der für REFINE ermittelten Sekundäranteile für Kunststoffe für alle Regionen, Jahre und Szenarien**

	GreenLate DE bzw. EU/RoW	GreenSupreme und H <sub>2</sub> DE bzw. EU/RoW
PET, Getränke		
2030	30 % / 20 %	35 % / 25 %

<sup>16</sup> Kategorie I: "starre" Kunststoffe; Kategorie II: "flexible" Kunststoffverpackungen aus einer oder mehreren Schichten, Kunststofffolien und Abdeckungen aus Kunststofffolie, Tragetaschen/Beutel; Kategorie III: mehrschichtige Kunststoffverpackung (eine Schicht aus Kunststoff und mindestens eine Schicht aus einem anderen Material)

	GreenLate DE bzw. EU/RoW	GreenSupreme und H <sub>2</sub> DE bzw. EU/RoW
2040	50 % / 40 %	55 % / 50 %
2050	70 % / 60 % (Linearer Anstieg)	75 % / 75 %
Alle anderen Kunststoffe und Kunststoffnutzungen		
2030	35 % / 30 %	40 % / 35 %
2040	65 % / 55 %	70 % / 65 %
2050	90 % / 80 %	95 % / 95 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

#### 4.2.2.2.4 Sensitivität: Variation der Sekundäranteile von Metallen

Wie in Kapitel 4.2.2.2.3 beschrieben, wurden die Sekundäranteile für Metalle, die in RESCUE angesetzt waren, systematisch überprüft, teilweise neu festgelegt und soweit möglich auch für die weiteren Regionen und Szenarien differenziert. Diese Sekundäranteile bilden dabei theoretisch maximale Potenziale für verfügbare Sekundärmaterialmengen ab. Das heißt, Aspekte wie Möglichkeiten und Effizienz der Erfassung und Vorbereitung der Sekundärmetalle für den Wiedereinsatz in die Produktion sind nicht berücksichtigt. Mit der Sensitivität für Sekundäranteile wird der Einfluss des hohen Ambitionsgrades auf den mit dem IOT-Modell ermittelten Rohstoffkonsum am Beispiel des Szenarios GreenSupreme geprüft.

Hierzu wurden für die Basismetalle Eisen, Aluminium und Kupfer verschiedene Prognosen für globale Sekundärmetalleinsatzquoten (RIR) aus der Literatur gesichtet und mit den in der Vertiefungsstudie festgelegten RC-Quoten für GreenSupreme (RoW) verglichen. Es wurden zwei unterschiedliche Berechnungsvarianten der Recyclinginputquote berücksichtigt; zum einen der Gesamtschrottinput (new+old scrap) in Relation zur Gesamtproduktion (RC-Variante 1 siehe Tabelle 6) und zum anderen wurde ausschließlich der Altschrott (old scrap bzw. end-of-life (EoL) scrap) als Input zur Gesamtproduktion berücksichtigt (RC-Variante 2 siehe Tabelle 6). Beide Quoten werden in der Praxis als Circular Economy (CE)-Indikatoren genutzt, beinhalten aber unterschiedliche Systemgrenzen. Erstere umfasst neben dem EoL Schrott auch neuen Schrott, der während des Herstellungsprozesses anfällt und direkt im Kreislauf geführt wird (Hagelücken et al. 2023). Dieser wird nach Definition der Europäischen Kommission nicht im Indikator EoL-RIR einbezogen.

Zur Festlegung der RC-Quoten für die Sensitivität wurden Industriedaten<sup>17</sup> mit den in GreenSupreme (RoW) genutzten Sekundäranteilen verglichen und der relative Unterschied ermittelt. Zunächst für die einzelnen Metalle und einzelnen Jahre, um schließlich einen Gesamtdurchschnitt abzuleiten (siehe Tabelle 6).

Der Vergleich der relativen Differenzen zu GreenSupreme zeigt deutlich, dass die Abweichungen bei ausschließlicher Berücksichtigung von EoL-Schrott deutlich höher ausfallen; insgesamt liegt die EoL-RIR um -43 % niedriger als in GreenSupreme angenommen. Wird auch new scrap bewertet wie in RC-Variante 1, dann liegt die Differenz deutlich niedriger bei etwa -17 % (siehe Tabelle 6).

<sup>17</sup> Für Aluminium wurden Daten des Modelliertools AluCycle, für Kupfer die Studie der International Copper Alliance und für Eisen die Iron and Steel Technology Roadmap der IEA genutzt. (IAI 2023; ICA 2023; IEA 2020)

**Tabelle 6: Übersicht unterschiedlicher RC Quoten und relative Differenz zu GreenSupreme Sekundäranteilen (Welt ohne EU)**

	Jahr	RC-Quote Green Supreme	RC-Variante 1	RC-Variante 2
Aluminium (Al)	2020		35 %	21 %
Aluminium (Al)	2030	45 %	42 %	27 %
Aluminium (Al)	2040	58 %	48 %	33 %
Aluminium (Al)	2050	65 %	53 %	38 %
<b>Relativer Unterschied Al (2030-2050) zu GreenSupreme</b>			<b>-14 %</b>	<b>-42 %</b>
Kupfer (Cu)	2018		33 %	16 %
Kupfer (Cu)	2030	36 %	35 %	23 %
Kupfer (Cu)	2040	45 %	36 %	23 %
Kupfer (Cu)	2050	51 %	38 %	21 %
<b>Relativer Unterschied Cu (2030-2050) zu GreenSupreme</b>			<b>-16 %</b>	<b>-48 %</b>
Eisen (Fe)	2019		32 %	23 %
Eisen (Fe)	2030	41 %	36 %	27 %
Eisen (Fe)	2040	53 %	41 %	31 %
Eisen (Fe)	2050	59 %	45 %	35 %
<b>Relativer Unterschied Fe (2030-2050) zu GreenSupreme</b>			<b>-19 %</b>	<b>-39 %</b>
<b>Gesamtdurchschnitt (2030-2050)</b>			<b>-17 %</b>	<b>-43 %</b>

Quelle: eigene Berechnungen ifeu auf Basis von (IAI 2023; ICA 2023; IEA 2020).

Für die Sensitivitätsberechnungen wurde unter Berücksichtigung der Auswirkung der Systemgrenze entschieden, die Differenz GreenSupreme und RC-Variante 2 zugrunde zu legen. Dieser Ansatz passt auch zur Herangehensweise der Vertiefungsstudien (siehe Kapitel 4.2.2.2.3), wo „new scrap“, so dieser nach Datenlage anfiel, rechnerisch ausgenommen wurde, da dieser in der IOT als interne Verrechnung enthalten wäre.

Als pauschaler Reduzierungswert wurde folglich -50 % festgelegt. Der Reduzierungsbetrag von -50 % wird neben den drei Metallen Eisen, Aluminium und Kupfer, auch für sieben weitere Metalle angewendet und gilt für alle Jahre, Regionen und Szenarien.

Ausgehend von den in Tabelle 4 festgelegten RC-Quoten für die betrachteten Metalle werden für die Sensitivitätsberechnung folgende um 50 % reduzierten Anteile der Sekundärmetallanteile festgelegt (Tabelle 7).

**Tabelle 7: Sekundärmetallanteile in 2050 in GreenSupreme in der Sensitivitätsberechnung**

Material	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
Eisen/Stahl	2050	38 %	38 %	30 %
Aluminium	2050	33 %	33 %	33 %
Kupfer	2050	30 %	30 %	26 %
Blei	2050	48 %	48 %	48 %
Zink	2050	41 %	41 %	41 %
Nickel	2050	48 %	48 %	38 %
Lithium	2050	35 %	35 %	27 %
Gold	2050	21 %	21 %	21 %
Silber	2050	25 %	25 %	22 %
Platin	2050	48 %	48 %	10 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu

## 5 Berechnungsergebnisse des umweltökonomischen Ressourcenmodells URMOD-3R

### 5.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die gesamtwirtschaftliche Nutzung von Rohstoff- und Energieressourcen mit Hilfe des oben dargestellten URMOD-3R Konzeptes betrachtet (Top-down), während im nachfolgenden Kapitel der Rohstoffbedarf isoliert für die einzelnen Schlüsseltechnologien auf der Grundlage von angepassten ecoinvent-Datensätzen untersucht wurde (Bottom-up).

Die nachfolgend für den Top-down Ansatz dargestellten Ergebnisse beziehen sich weitgehend auf das Szenario GreenSupreme. Im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien handelt es sich dabei um das Szenario mit dem ambitioniertesten Transformationspfad und dem geringsten Rohstoffbedarf. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den beiden anderen Szenarien erfolgt in Kapitel 5.7. Detaillierte Tabellen mit Ergebnissen für alle Szenarien und Jahre und einer Gliederung nach 54 Rohstoffen sind als separater Excel-Anhang veröffentlicht.

Es werden in dem Ansatz, wie bereits erwähnt, folgende Ressourcenkategorien berücksichtigt: Primärrohstoffe, Sekundärrohstoffe (stoffliche Verwertung von Abfällen) primäre erneuerbare Energien und Sekundärenergien (energetische Verwertung von Abfällen). Das Modell kann aber grundsätzlich auch auf andere Ressourcenarten, wie Flächennutzung oder Nutzung der Umwelt als Senke für Emissionen angewendet werden.

Zentrale Variable des Modells ist die gemäß den Konzepten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen abgegrenzte „letzte inländische Verwendung“ (Konsum und Investitionsgüter). In URMOD-3R wird der über die gesamte Produktionskette anfallende Ressourcenaufwand zur Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung kumuliert. (Zur ausführlicheren Darstellung der methodischen Grundlagen des umweltökonomischen Ressourcenmodells (URMOD-3R) siehe Kapitel 4.1.1.)

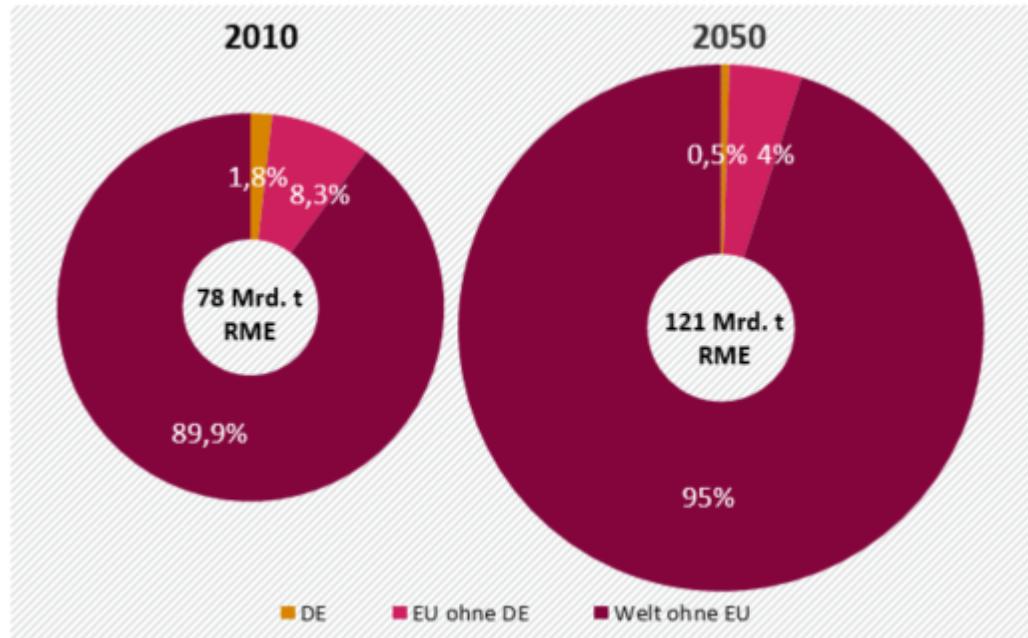
Im Falle von Primärrohstoffen wird die Rohstofffinanzspruchnahme hier in der Einheit Tonnen Rohstoffäquivalent (raw material equivalent, RME) dargestellt. Für andere Ressourcenarten werden in URMOD-3R spezifische Darstellungseinheiten wie Tonnen Öläquivalent (TOE) für Energieträger, Tonnen Metallgehalt im Erz für Primärmetalle oder Tonnen für andere Materialien verwendet.

Die Berechnungsergebnisse werden jeweils für die drei im Modell unterschiedenen Regionen Deutschland (DE), EU ohne DE (RoE) und die Welt ohne EU (RoW) dargestellt. Die Region EU ohne DE umfasst in URMOD-3R die EU28 ohne Deutschland..

### 5.2 Deutschland im Weltvergleich

Abbildung 2 präsentiert den Anteil der hier betrachteten Regionen an dem Bedarf von Primärrohstoffen in der Welt. Der Primärrohstoffkonsum (raw material consumption, RMC) ist hierbei in der Einheit RME (raw material equivalents, Rohstoffäquivalente) angegeben. Im Jahre 2010 beanspruchte Deutschland 1,8 % des Weltbedarfs an Primärrohstoffen (EU ohne DE 8,3 %). Bis zum Jahr 2050 verringert sich der Anteil auf 0,5 % (EU ohne DE 4 %).

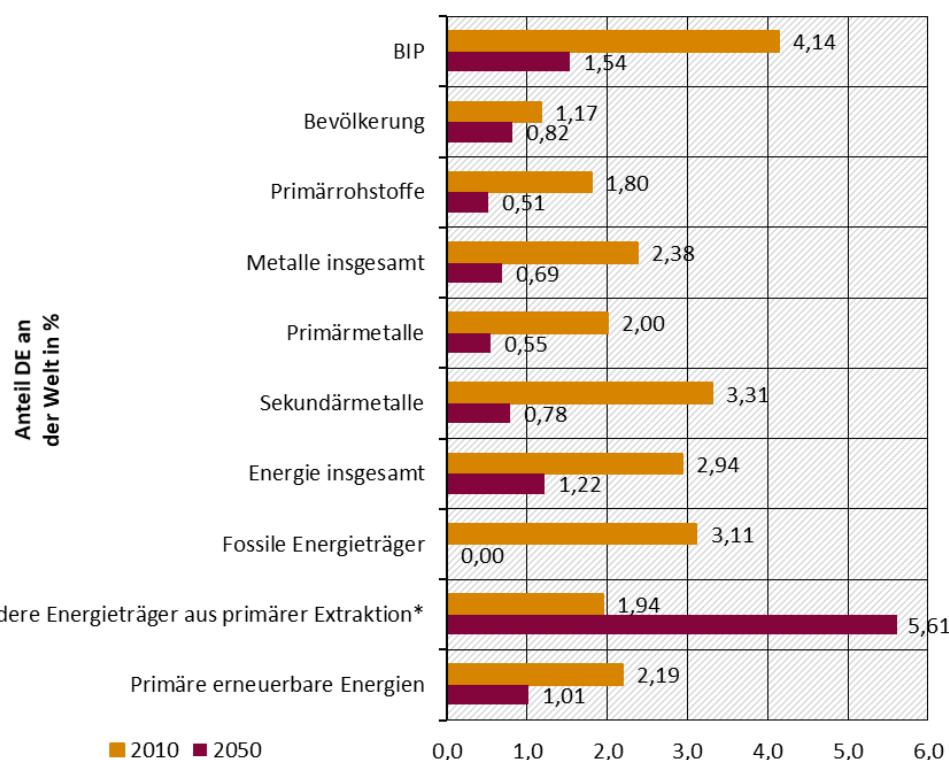
**Abbildung 2: Primärrohstoffkonsum (RMC) 2010 und 2050 der drei Regionen in GreenSupreme**



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Im Vergleich zu den Anteilen Deutschlands am Welt-Bruttoinlandsprodukt (4,14 % im Jahr 2010 und 1,54 % im Jahr 2050) sind die Anteile Deutschlands bei Primärrohstoffen deutlich unterproportional (siehe Abbildung 3). Dies gilt generell auch für alle anderen in der Abbildung 3 betrachteten Ressourcen mit Ausnahme von sonstigen Energieträgern.

**Abbildung 3: Anteile Deutschlands an der Welt in 2010 und in 2050 im Szenario GreenSupreme**



\*Fußnote: Andere Energieträger aus primärer Extraktion umfassen Nuklearenergie und Energie aus primärer landwirtschaftlicher Biomasse.

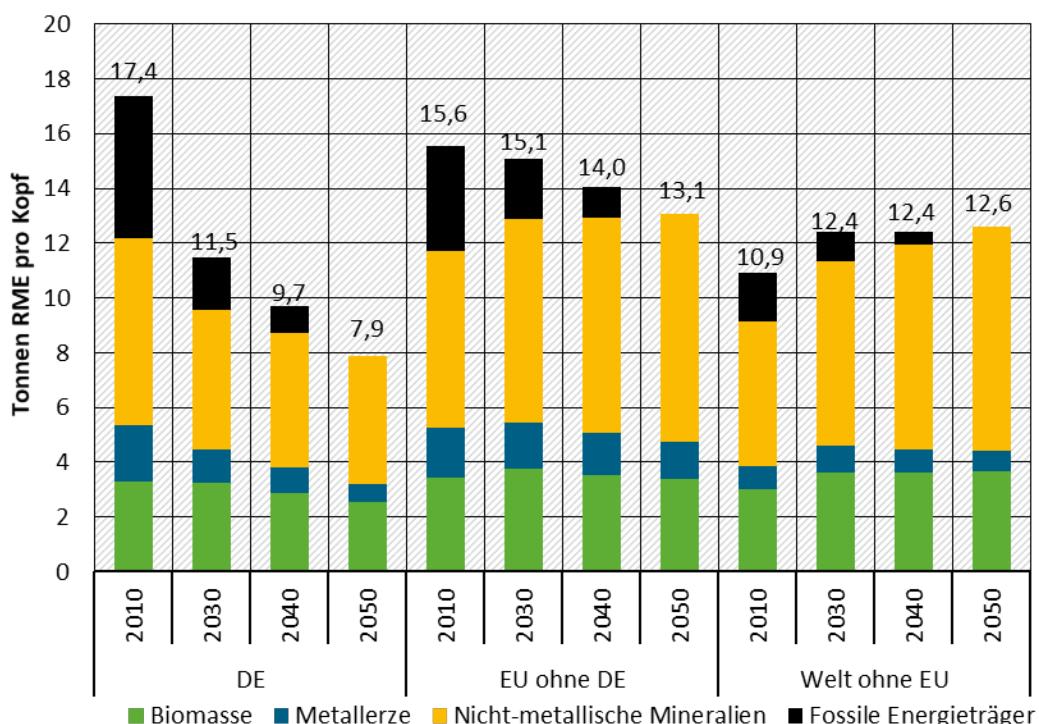
Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

## 5.3 Primärrohstoffkonsum

### 5.3.1 Überblick Ergebnisse Primärrohstoffkonsum (RMC)

Abbildung 4 stellt die generelle Entwicklung des Primärrohstoffkonsums (RMC) pro Kopf (auch „Rohstoff-Fußabdruck“<sup>18</sup>) von 2010 bis 2050 dar. Die Höhe des RMC pro Kopf war im Jahre 2010 in Deutschland (17,4 t RME) und EU ohne DE (15,6 t RME) recht ähnlich. In der Welt ohne EU lag der Wert aber mit 10,9 t RME deutlich niedriger. Im Zeitraum 2010 bis 2050 entwickelt sich diese Größe in den Regionen sehr unterschiedlich. Für Deutschland vermindert sich der RMC pro Kopf um 55 %, für EU ohne DE ergibt sich ein Rückgang um 17 %. Dagegen zeigt sich für die Welt ohne EU ein Anstieg von 16 % (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf im Szenario GreenSupreme nach Jahren



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

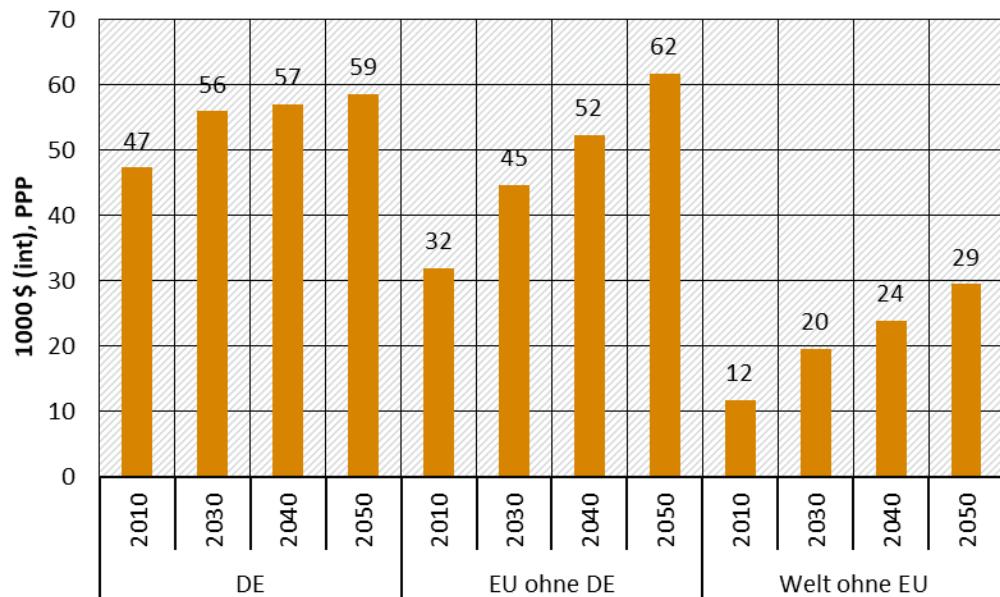
Die Differenzen dürften wesentlich durch Unterschiede bezüglich der Wachstumsdynamik der drei Regionen beeinflusst sein. Das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) zwischen 2010 und 2050 beläuft sich, wie bereits erwähnt, auf 20 % für DE, 91 % für die EU ohne DE und 258 % für die Welt ohne EU.

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des BIP pro Kopf und illustriert darüber hinaus, dass der vergleichsweise starke Rückgang des RMC pro Kopf für Deutschland einhergeht mit einer entsprechend schwächeren Entwicklung des BIP pro Kopf. Das BIP pro Kopf für Deutschland erhöht sich im Zeitraum 2010 bis 2050 mit +26 % recht verhalten im Vergleich zu den anderen beiden Regionen (EU ohne DE +95 %, Welt ohne EU +142 %). Die Unterschiede in der

<sup>18</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-rohstoffkonsum> (23.02.2024)

Entwicklung des RMC mit einem vergleichsweise starken Rückgang des RMC für Deutschland ist auf die Annahme einer nacholenden Entwicklung zurückzuführen.

**Abbildung 5: BIP pro Kopf in den Szenarien GreenSupreme (und H<sub>2</sub>)**



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

In absoluten Zahlen vermindert sich der Gehalt der Güter der letzten Inländischen Verwendung (LIV) an Primärrohstoffen gemäß den Annahmen bis zum Jahre 2050 für Deutschland (DE) von 1.413 Mio. t RME auf 624 Mio. t RME (-56 %) (siehe Tabelle 8). Für EU ohne Deutschland ergibt sich ein deutlich geringerer Rückgang von -17 %. Bei der übrigen Welt ist ein deutlicher Anstieg von 65 % zu verzeichnen. Aufgrund der während des betrachteten Zeitraums erwarteten vollständigen Substitution von fossilen durch erneuerbare Energieträger werden in 2050 keine fossilen Energieträger mehr verwendet. Auch geht die Verwendung von Erzen in Deutschland (-69 %) und in der EU ohne DE (-26 %) zurück. In der Welt ohne EU steigt der Bedarf zwar (+22 %), die Zunahme fällt aber in Anbetracht des deutlichen Wirtschaftswachstums von +258 % relativ moderat aus. Der Bedarf an nicht-metallischen Mineralien vermindert sich für Deutschland um 33 %. Für die EU ohne Deutschland ergibt sich eine Zunahme um 27 %. Für die übrige Welt steigt der Bedarf um 122 %.

**Tabelle 8: Überblick über die Nutzung von Primärrohstoffen gemäß GreenSupreme**

Kumulierter Rohstoffgehalt der Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)

Indikator	Einheit	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>Primärrohstoffe pro Kopf</b>	<b>t RME p.c.</b>	<b>2050</b>	<b>7,90</b>	<b>13,09</b>	<b>12,61</b>
<b>Primärrohstoffe insgesamt</b>	<b>Mio. t RME</b>	<b>2050</b>	<b>624</b>	<b>5.433</b>	<b>115.927</b>
Biomasse	Mio. t RME	2050	200	1.399	33.759
Metallerze	Mio. t RME	2050	52	561	6.715
Nicht-metallische Mineralien	Mio. t RME	2050	373	3.473	75.453
Fossile Energieträger	Mio. t RME	2050	0	0	0
<b>Primärrohstoffe pro Kopf</b>	<b>t RME p.c.</b>	<b>2010</b>	<b>17,38</b>	<b>15,57</b>	<b>10,94</b>
<b>Primärrohstoffe insgesamt</b>	<b>Mio. t RME</b>	<b>2010</b>	<b>1.413</b>	<b>6.530</b>	<b>70.454</b>
Biomasse	Mio. t RME	2010	268	1.437	19.358
Metallerze	Mio. t RME	2010	168	759	5.513
Nicht-metallische Mineralien	Mio. t RME	2010	554	2.718	33.970
Fossile Energieträger	Mio. t RME	2010	423	1.616	11.612

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

### 5.3.2 Generelle Bestimmungsgründe für die Entwicklung des RMC

Die Aufstellung von Szenarien durch URMOD-3R beruht auf der Variation von zwei grundlegenden Elementen: a) Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage nach Konsum- und Investitionsgütern einerseits sowie b) Annahmen zur Entwicklung der Produktionstechnologie andererseits. Gemäß der Modelllogik bietet sich an, den Einfluss dieser beiden Grundparameter zu untersuchen. Dazu wurden bezüglich der Entwicklung zwischen dem Basisjahr 2010 und dem Szenario-Jahr GreenSupreme 2050 zwei Simulationsrechnungen durchgeführt. In der ersten Variante zur Messung des Nachfrageeffektes wurde die Produktionstechnologie konstant gehalten (Güterverflechtungsmatrix für das Jahr 2010) und die Güternachfrage variiert (LIV-Matrix für das Jahr 2050). Als Ergebnis ergibt sich der isolierte Nachfrageeffekt (ceteris paribus) durch den Anstieg der LIV. Für die Messung des Technologieeffektes wurde umgekehrt verfahren: LIV-Matrix des Jahres 2010 und Güterverflechtungsmatrix des Jahres 2050. Dadurch ergibt sich entsprechend der isolierte Technologieeffekt (ceteris paribus).

Die Ergebnisse werden in Tabelle 9 dargestellt.

**Tabelle 9: Simulation des Einflusses des Nachfrage- und des Technologieeffekts auf den RMC**

GreenSupreme 2050, Basismodell 2010 = 100

Indikator	Produktions-technologie	Letzte inländische Verwendung	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>Basismodell 2010</b>	2010	2010	100,0	100,0	100,0
<b>Nachfrageeffekt c.p.</b>	2010	2050	99,7	164,9	284,2
<b>Technologieeffekt c.p. insgesamt</b>	2050	2010	51,9	52,1	61,4
Biomasse	2050	2010	76,7	68,3	78,2
Metallerze	2050	2010	32,5	33,4	32,7
Nicht-metallische Mineralien	2050	2010	81,5	76,5	75,6
Fossile Energieträger	2050	2010	5,0	5,2	5,6
<b>Nachrichtlich: Veränderung des BIP</b>			120,5	191,3	358,1

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Der Nachfrageeffekt fällt für die betrachteten Regionen sehr unterschiedlich aus. Für DE liegt der Effekt bei nahezu null, für die anderen beiden Regionen ergeben sich dagegen deutlich erhöhende Einflüsse (EU ohne DE +65 % und Welt ohne EU +184 %).

Der Nachfrageeffekt lässt sich gedanklich in zwei grundlegende Faktoren aufspalten, den Skaleneffekt und den Struktureffekt (vgl. Kap. 4.2.2.1). Beide Faktoren sind durch die Festlegung der Annahmen zur Entwicklung der LIV in das Modell eingegangen.

Der Skaleneffekt entspricht den Annahmen zur Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP). Grundsätzlich wird die Entwicklung der LIV wesentlich durch Annahme über die Entwicklung des BIP beeinflusst. Dieser Effekt wird aber überlagert durch den Struktureffekt.

Der **Struktureffekt** fasst folgende Einflussfaktoren zusammen (siehe auch Kapitel 4.2.2.1.2):

- Die Veränderung der Anteile einzelner Konsum- und Investitionskategorien. Die Berücksichtigung dieses Faktors ist wichtig, weil die Rohstoffintensitäten der einzelnen Kategorien sich deutlich unterscheiden können.
- Bereinigung der BIP-Entwicklung um solche Qualitätssteigerungen, die nicht oder nur wenig rohstoffrelevant sind.
- Eine Reihe von speziellen Annahmen bezüglich der Nachfrage der Haushalte nach Nahrungsmitteln und direkte Nachfrage nach Energie, dem Mobilitätsverhalten der Haushalte sowie Annahmen zur Entwicklung von Investitionen in Anlagen für Schlüsseltechnologien, welche für die Energiewende von besonderer Bedeutung sind.

Der **Technologieeffekt** hat für alle drei Regionen einen deutlich entlastenden Einfluss auf den RMC. Aufgrund dieses Faktors vermindert sich der RMC c.p. folgendermaßen: Deutschland und EU ohne DE jeweils rd. -48 %, Welt ohne EU -39 %. Bezogen auf die Rohstoffarten ist der Entlastungseffekt am stärksten bei fossilen Energieträgern (nahezu 100 %) aufgrund des Umbaus des Energiesystems und bei Metallen (rund 67 %) für alle Regionen, insbesondere

aufgrund der gestiegenen Recyclingraten. Bei Biomasse liegt der Einspareffekt zwischen 22 % und 25 %. Am schwächsten ausgeprägt ist der Entlastungseffekt bei nicht-metallischen Mineralien (19 % bis 24 %).

### 5.3.3 RMC nach Hauptverwendungskategorien

Tabelle 10 stellt die Anteile der Hauptkategorien der letzten inländischen Verwendung am RMC dar. Darüber hinaus liefert die Tabelle auch entsprechende Informationen zu den Kategorien Rohstoffaufwendungen für den Konsum von Lebensmitteln und die Aufwendungen für die Investitionen in Anlagen für die Schlüsseltechnologien.

**Tabelle 10: Anteile der Kategorien der letzten inländischen Verwendung am Primärrohstoffkonsum (RMC) in GreenSupreme (in Prozent)**

Indikator	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>Primärrohstoffkonsum insgesamt</b>	<b>2050</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
Konsum	2050	52,5	39,4	35,1
<i>Davon: Konsum tierischer Produkte</i>	2050	1,8	1,2	1,2
Investitionen in Maschinen/sonstige Anlagen	2050	6,1	8,6	5,1
Investitionen in Bauten	2050	41,4	52,0	59,8
<i>Davon: Bauten für Schlüsseltechnologien</i>	2050	1,6	1,6	1,3
<b>Primärrohstoffkonsum insgesamt</b>	<b>2010</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
Konsum	2010	55,0	52,5	43,6
<i>Davon: Konsum tierischer Produkte</i>	2010	7,3	9,7	7,9
Investitionen in Maschinen/sonstige Anlagen	2010	11,7	11,1	7,8
Investitionen in Bauten	2010	33,3	36,4	48,5
<i>Davon: Bauten für Schlüsseltechnologien</i>	2010	0,7	0,5	0,2

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Tabelle 10 zeigt, dass der Anteil der Aufwendungen für Konsumausgaben am RMC für Deutschland zwischen 2010 und 2050 nur relativ leicht zurückgeht (-2,5 Prozentpunkte), während die Anteile für die EU ohne Deutschland (-15,6 Prozentpunkte) und der übrigen Welt (-11,3 Prozentpunkte) sich erheblich stärker zugunsten der rohstoffintensiveren Bauinvestitionen vermindern.

Der Anteil des Rohstoffaufwandes für den Konsum tierischer Produkte vermindert sich in den drei betrachteten Regionen zwischen 75 % und 88 %. Diese Entwicklung spiegelt die Annahme wider, dass die besonders rohstoffintensiven tierischen Lebensmittel in erheblichem Umfang durch pflanzliche Lebensmittel ersetzt werden (siehe hierzu auch die entsprechenden Annahmen im Abschnitt Konsummatrix in Kapitel 4.2.2.1.2).

Bei der Investitionskategorie Maschinen und sonstige Anlagen sind für alle drei Regionen erhebliche Rückgänge der Anteile zu verzeichnen. Der Anteil verringert sich für Deutschland von 11,7 % auf 6,1 %. Für die EU ohne Deutschland fällt der Rückgang etwas schwächer aus (von 11,1 % auf 8,6 %). Bei der übrigen Welt geht der Anteil von 7,8 % auf 5,1 % zurück. Bei der

Interpretation dieser Entwicklung ist u. a. zu berücksichtigen, dass für diese Investitionskategorie angenommen wurde, dass der Anteil wissensbasierter Investitionen (Intellektuelles Vermögen, IKT-Anlagen) im Vergleich zu materialbasierten Investitionen spürbar zunimmt.

Der Anteil der besonders rohstoffintensiven Bauinvestitionen steigt in allen drei Regionen. Am stärksten ist die Zunahme für EU ohne DE (+15,6 Prozentpunkte). Für Deutschland liegt der Anstieg bei 8,1 Prozentpunkten. Für die übrige Welt ergibt sich, ausgehend von einem deutlich höheren Niveau eine Zunahme von 11,3 Prozentpunkten.

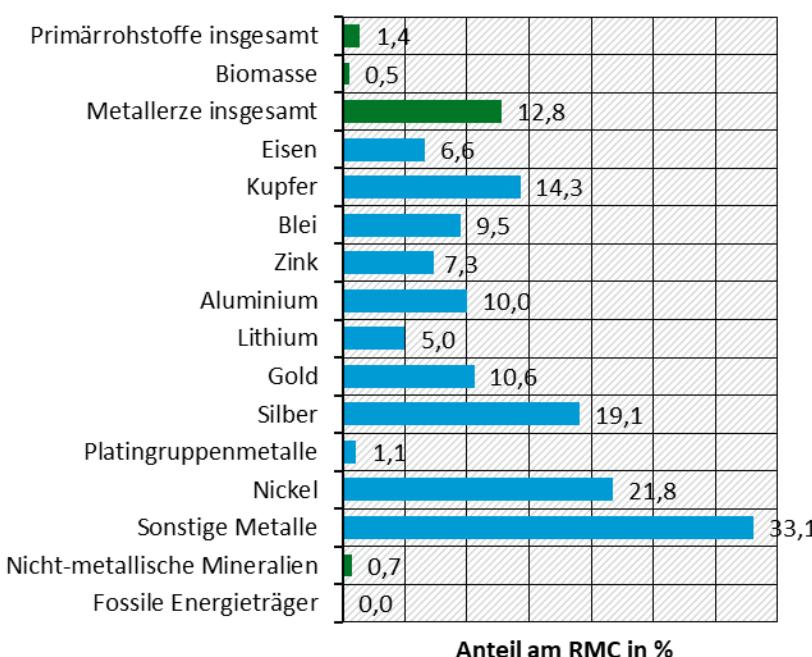
### 5.3.4 Rohstoffkonsum für Schlüsseltechnologien

Die Rohstoffaufwendungen für die Investitionen in Anlagen für die Schlüsseltechnologien vervielfachen sich erwartungsgemäß gegenüber dem Basisjahr. Bemerkenswert ist aber, dass der Rohstoffaufwand, gemessen an dem Aufwand für die gesamte LIV (RMC), sich im Jahre 2050 nur in der Größenordnung von 1,3 bis 1,6 % bewegt. Allerdings spiegelt der hier betrachtete Gesamtlohstoffaufwand nicht wider, dass die Materialzusammensetzung sich deutlich von den übrigen Bauinvestitionen unterscheidet. So liegt der Anteil der Metalle am Gesamtlohstoffinput dieser Kategorie bei nahezu 80 %, während sich der Metallanteil bei den Bauinvestitionen insgesamt auf weniger als 6 % beläuft.

Abbildung 6 zeigt die Anteile der Schlüsseltechnologien am weltweiten Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffarten.

**Abbildung 6: Weltweiter Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien in GreenSupreme im Jahr 2050**

Anteil am Primärrohstoffkonsum (RMC) in %



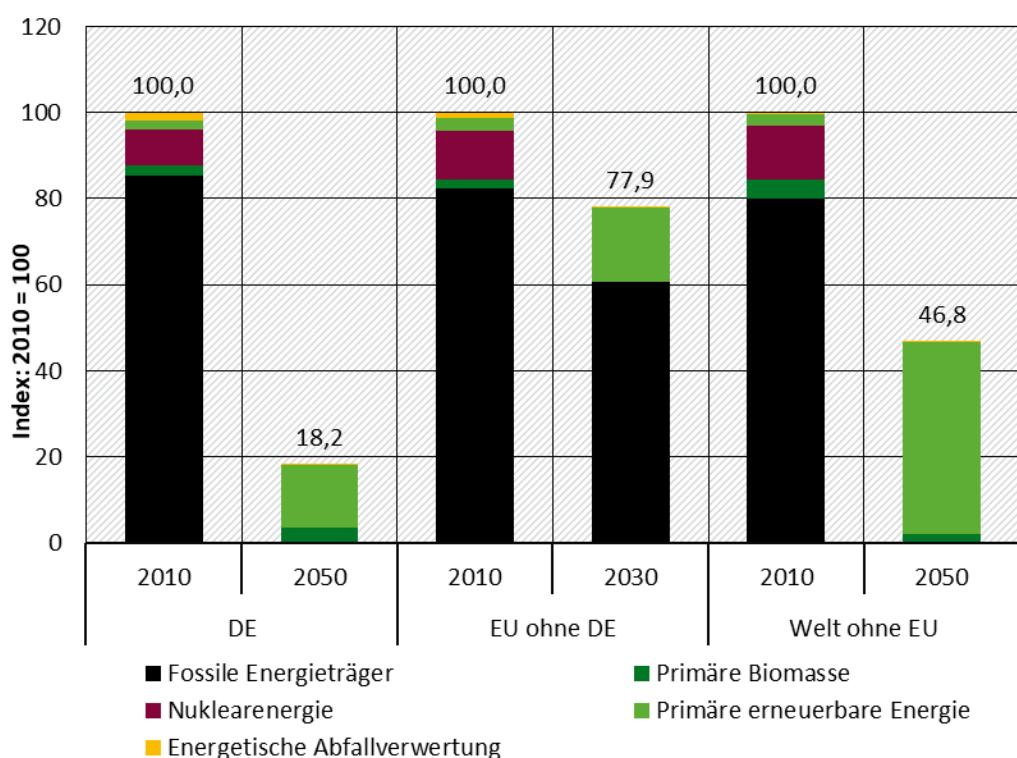
Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Der Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien insgesamt am RMC<sup>19</sup> beläuft sich im Jahr 2050 auf lediglich 1,4 %. Deutlich unterproportional sind die Anteile für Biomasse (0,5 %), nicht-metallische Mineralien (0,7 %) und fossile Energieträger (0,0 %), Im Vergleich dazu liegt der Anteil bei Metallerzen mit 12,8 % deutlich höher. Gemessen am Gesamtmetallbedarf überproportionale Anteile entfallen auf Kupfer (14,3 %), Silber (19,1 %), Nickel (21,8 %) und sonstige Metalle (33,1 %).

## 5.4 Energieressourcen

Die Berechnungsergebnisse werden in Abbildung 7 und Tabelle 11 dargestellt. Die Energieträgerstruktur ändert sich für alle Regionen grundlegend. Im Basisjahr 2010 gab es eine eindeutige Dominanz der fossilen Energieträger. Der Anteil der fossilen Energie lag bei DE bei 85 %. Für die anderen beiden Regionen war der Anteil etwas geringer (EU ohne DE 83 %, Welt ohne EU 80 %). Bis zum Jahre 2050 wird fossile Energie vollständig substituiert, insbesondere durch primäre erneuerbare Energien.

Abbildung 7: Entwicklung fossiler und erneuerbarer Energieressourcen in GreenSupreme



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Dadurch vermindert sich der Energiebedarf auch insgesamt sehr stark, trotz teilweise erheblich gestiegener Wirtschaftsleistung. In Deutschland verringert sich der kumulierte Ressourcengehalt der Güter (in 1000 TOE) der letzten inländischen Verwendung um 82 %. Für EU ohne DE lag der Rückgang bei 71 % und für Welt ohne EU bei 53 %. Die Unterschiede dürften insbesondere durch Unterschiede beim Wirtschaftswachstum begründet sein. Die hohen Effizienzsteigerungen sind durch eine Vielzahl von Faktoren begründet, wie z. B. weitgehender

<sup>19</sup> Auf der Weltebene sind der RMC und die Inländische Entnahme von Primärrohstoffen für jede einzelne Rohstoffart definitionsgemäß identisch. Bei der Betrachtung einzelner Regionen müssen zusätzlich jeweils die Import- und Exportströme (in t RME) berücksichtigt werden. So gibt es zum Beispiel in Deutschland, abgesehen von geringfügigen Mengen an Eisenerz, keine inländische Entnahme von Erzen, wohl aber signifikante ERZ-RMC.

Wegfall von Umwandlungsverlusten bei der Strom- und Wärmeerzeugung, verbesserte Wärmedämmung von Gebäuden, Nutzung effizienter Technologien zu Wärmeerzeugung, Substitution von Fahrzeugen mit konventionellem Antrieb durch Fahrzeuge mit Elektroantrieb und schließlich der Umbau von Industrie-Prozessen. Ferner ist in diesem Zusammenhang die deutliche Zunahme von Recycling bei Metallen und anderen Materialien von Bedeutung.

**Tabelle 11: Fossile und erneuerbare Energieressourcen 2010 und 2050 in GreenSupreme**

Kumulierter Ressourcengehalt der Güter der letzten inländischen Verwendung in 1000 TOE

Indikator	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>Energieträger insgesamt</b>	<b>2050</b>	<b>70.302</b>	<b>466.524</b>	<b>5.212.271</b>
<b>Fossile Energieträger</b>	<b>2050</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Braunkohle	2050	0	0	0
Steinkohle	2050	0	0	0
Ölhaltige Schiefer und Sande	2050	0	0	0
Torf	2050	0	0	0
Erdöl, Erdgaskondensate und Flüssigerdgas	2050	0	0	0
Erdgas	2050	0	0	0
<b>Andere Energieträger aus primärer Extraktion</b>	<b>2050</b>	<b>14.087</b>	<b>2.164</b>	<b>234.658</b>
Nuklearenergie	2050	0	0	0
Brennholz	2050	0	0	0
Biokraftstoffe aus landwirtschaftlicher Biomasse	2050	4.516	591	82.003
Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse	2050	9.571	1.573	152.655
<b>Primäre erneuerbare Energie</b>	<b>2050</b>	<b>55.574</b>	<b>464.051</b>	<b>4.977.234</b>
Wasserkraft	2050	2.935	45.115	360.251
Windenergie onshore	2050	24.074	98.543	1.176.711
Windenergie offshore	2050	8.273	70.060	201.137
PV Dach	2050	8.226	86.272	1.145.109
PV Freifläche	2050	3.346	34.727	517.706
Solarwärmekraft	2050	1.596	26.543	631.238
Gezeiten- und Wellenkraft	2050	420	11.729	83.691
Solarthermie	2050	903	36.456	331.483
Tiefengeothermie	2050	3.570	53.860	528.784

Indikator	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
Oberflächennahe Erdwärme	2050	2.231	746	1.124
<b>Energetische Abfallverwertung</b>	<b>2050</b>	<b>641</b>	<b>308</b>	<b>379</b>
<b>Energieträger insgesamt</b>	<b>2010</b>	<b>385.786</b>	<b>1.608.155</b>	<b>11.147.772</b>
<b>Fossile Energieträger</b>	<b>2010</b>	<b>328.786</b>	<b>1.326.998</b>	<b>8.902.821</b>
Braunkohle	2010	44.624	103.192	466.513
Steinkohle	2010	49.248	215.904	2.855.351
Ölhaltige Schiefer und Sande	2010	249	3.156	11.556
Torf	2010	179	1.094	1.213
Erdöl, Erdgaskondensate und Flüssigerdgas	2010	133.049	606.043	3.303.345
Erdgas	2010	101.437	397.609	2.264.842
<b>Andere Energieträger aus primärer Extraktion</b>	<b>2010</b>	<b>41.777</b>	<b>212.043</b>	<b>1.894.483</b>
Nuklearenergie	2010	32.015	179.419	1.374.845
Brennholz	2010	4.289	32.190	505.727
Biokraftstoffe aus landwirtschaftlicher Biomasse	2050	2.845	265	9.338
Biogas aus landwirtschaftlicher Biomasse	2050	2.627	169	4.572
<b>Primäre erneuerbare Energie</b>	<b>2010</b>	<b>8.255</b>	<b>50.178</b>	<b>318.649</b>
Wasserkraft	2010	4.104	33.029	259.351
Windenergie onshore	2010	2.365	8.118	19.455
Windenergie offshore	2010	9	11	13
PV Dach	2010	563	927	1.154
PV Freifläche	2010	63	103	128
Solarwärmekraft	2010	10	143	489
Gezeiten- und Wellenkraft	2010	2	32	10
Solarthermie	2010	281	4.355	14.862
Tiefengeothermie	2010	139	1.010	15.564
Oberflächennahe Erdwärme	2010	720	2.450	7.624
<b>Energetische Abfallverwertung</b>	<b>2010</b>	<b>6.968</b>	<b>18.935</b>	<b>31.819</b>

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

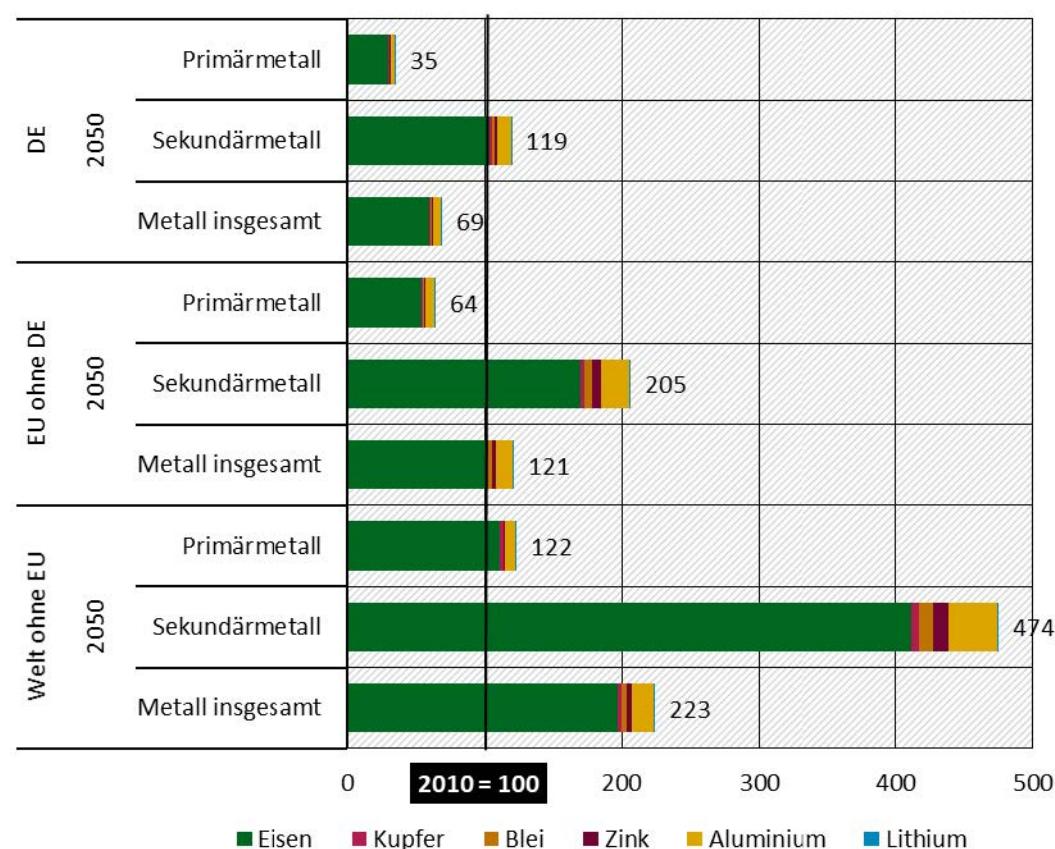
## 5.5 Metallische Primär- und Sekundärressourcen und Recycling sonstiger Materialien

In diesem Kapitel wird der kumulierte Gehalt an Primär- und Sekundärressourcen der Güter der letzten inländischen Verwendung gezeigt. Es werden ausgewählte Metalle (Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium) sowie andere ausgewählte Materialien (Holz, Papier, Plastik und Glas) dargestellt. Die Metallmengen werden durchgehend in Tonnen Metallgehalt angegeben; die Ströme der anderen Materialien in der Einheit Tonnen.

### 5.5.1 Metalle

Die Ergebnisse zu Metallen werden in Abbildung 8 und Tabelle 12 gezeigt. Die Nutzung der ausgewählten Metalle entwickelt sich insgesamt in den untersuchten Regionen unterschiedlich. Für Deutschland vermindert sich der Bedarf um 31 %, in der EU ohne DE ergibt sich eine Zunahme von 21 % und für die Welt ohne EU von 153 %. Die Unterschiede zwischen den Regionen sind u. a. durch die unterschiedlichen Ausgangsniveaus und Wachstums-Dynamiken begründet. Der Wachstumseffekt (Skaleneffekt) wird aber jeweils spürbar abgeschwächt durch entsprechende Änderungen bei der Nachfragestruktur (Struktureffekt) und durch Effizienzsteigerungen (Technologieeffekt).

**Abbildung 8: Veränderung des Einsatzes ausgewählter Primär- und Sekundärmetalle (Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium) 2050 ggü. 2010 in GreenSupreme**



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Die Differenzierung nach Primär- und Sekundärmetallen zeigt deutlich unterschiedliche Entwicklungen. Die Nutzung von Primärmetallen insgesamt vermindert sich für DE um 65 % (EU ohne DE -36 % und Welt ohne EU +22 %). Im Vergleich dazu erhöht sich der kumulierte

Gehalt der Güter der letzten inländischen Verwendung an Sekundärmetallen durchgehend: Deutschland +19 %, EU ohne DE +105 % und Welt ohne EU +374 %. Aufgrund steigender Recyclingraten kommt es zu beträchtlichen Einsparungen von metallischen Primärrohstoffen.

**Tabelle 12: Primär- und Sekundärmetalle in 2010 und in 2050 im Szenario GreenSupreme**

Kumulierter Ressourcengehalt der Güter der letzten inländischen Verwendung in 1000 t Metallgehalt

Indikator	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>Ausgewählte Metalle</b>	<b>2050</b>	<b>25.657</b>	<b>183.346</b>	<b>3.507.684</b>
<b>Primärmetalle</b>	<b>2050</b>	<b>7.887</b>	<b>58.204</b>	<b>1.376.934</b>
Eisen	2050	6.850	49.205	1.255.036
Kupfer	2050	187	1.428	22.195
Blei	2050	15	182	2.412
Zink	2050	73	804	11.659
Aluminium	2050	762	6.584	85.597
Lithium	2050	0	1	36
<b>Sekundärmetalle</b>	<b>2050</b>	<b>17.770</b>	<b>125.142</b>	<b>2.130.750</b>
Eisen	2050	15.475	103.732	1.850.670
Kupfer	2050	249	1.844	23.881
Blei	2050	281	3.483	46.211
Zink	2050	334	3.690	53.513
Aluminium	2050	1.431	12.392	156.445
Lithium	2050	0	1	29
<b>Ausgewählte Metalle</b>	<b>2010</b>	<b>37.419</b>	<b>151.969</b>	<b>1.384.962</b>
<b>Primärmetalle</b>	<b>2010</b>	<b>22.514</b>	<b>90.963</b>	<b>1.010.997</b>
Eisen	2010	20.327	82.907	945.526
Kupfer	2010	446	1.628	13.437
Blei	2010	69	310	3.838
Zink	2010	259	1.427	10.395
Aluminium	2010	1.414	4.690	37.775
Lithium	2010	0	1	27
<b>Sekundärmetalle</b>	<b>2010</b>	<b>14.905</b>	<b>61.006</b>	<b>373.965</b>
Eisen	2010	13.035	52.565	330.160
Kupfer	2010	152	522	2.940
Blei	2010	144	804	4.504
Zink	2010	33	182	549

Indikator	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
Aluminium	2010	1.542	6.933	35.813
Lithium	2010	0	0	0

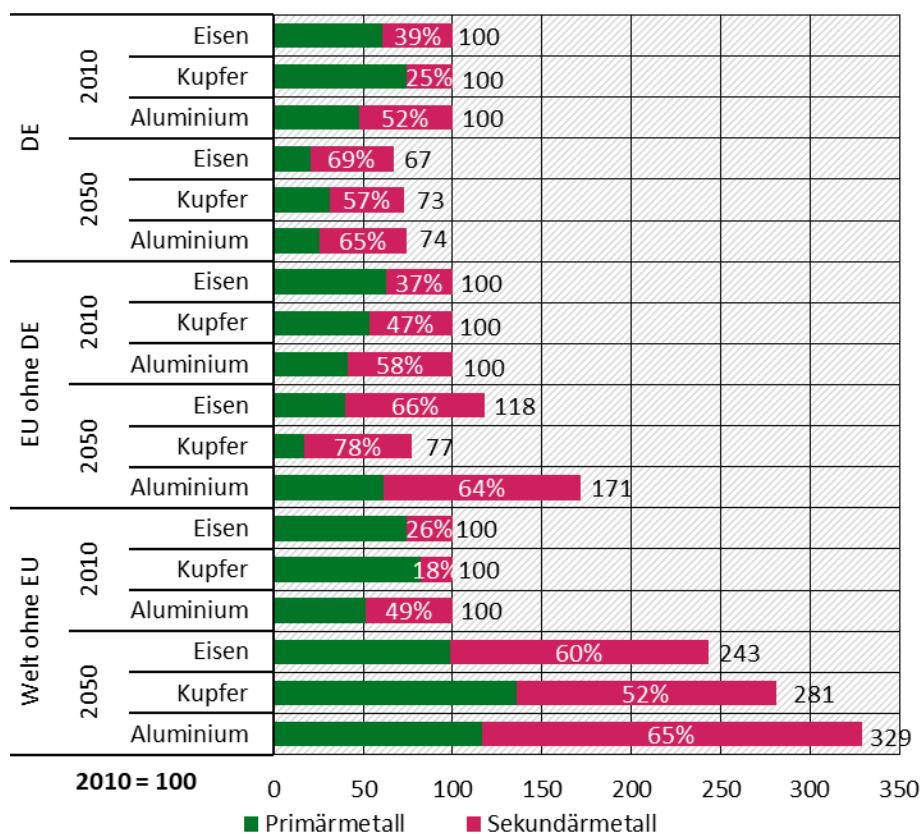
Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Die hier kommentierten Ergebnisse für Metalle insgesamt werden bei der Messung in Tonnen Metallgehalt stark dominiert durch die Entwicklung für Eisen.

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der Sekundär- und Primärmetallbedarfe von Eisen, Kupfer und Aluminium. Der Eisenbedarf sinkt in Deutschland um 33 %. In den beiden anderen Regionen ist die Tendenz gegenläufig; hier steigt die Eisennachfrage um 18 % (EU ohne DE) bzw. 143 % (Welt ohne EU).

Für Kupfer sinkt der kumulierte Bedarf in Deutschland und EU ohne DE um 27 % bzw. 23 %. Demgegenüber erhöht sich die Nachfrage in der Welt ohne EU um 181 %. Gleichzeitig steigt der Sekundäranteil auf 57 % in Deutschland auf 52 % in der Welt ohne EU. Am höchsten ist der Sekundäranteil in EU ohne DE mit 78 %.

**Abbildung 9: Entwicklung der Sekundär- und Primärmetallbedarfe von Eisen, Kupfer und Aluminium, Sekundäranteil in % (2010=100) in GreenSupreme**



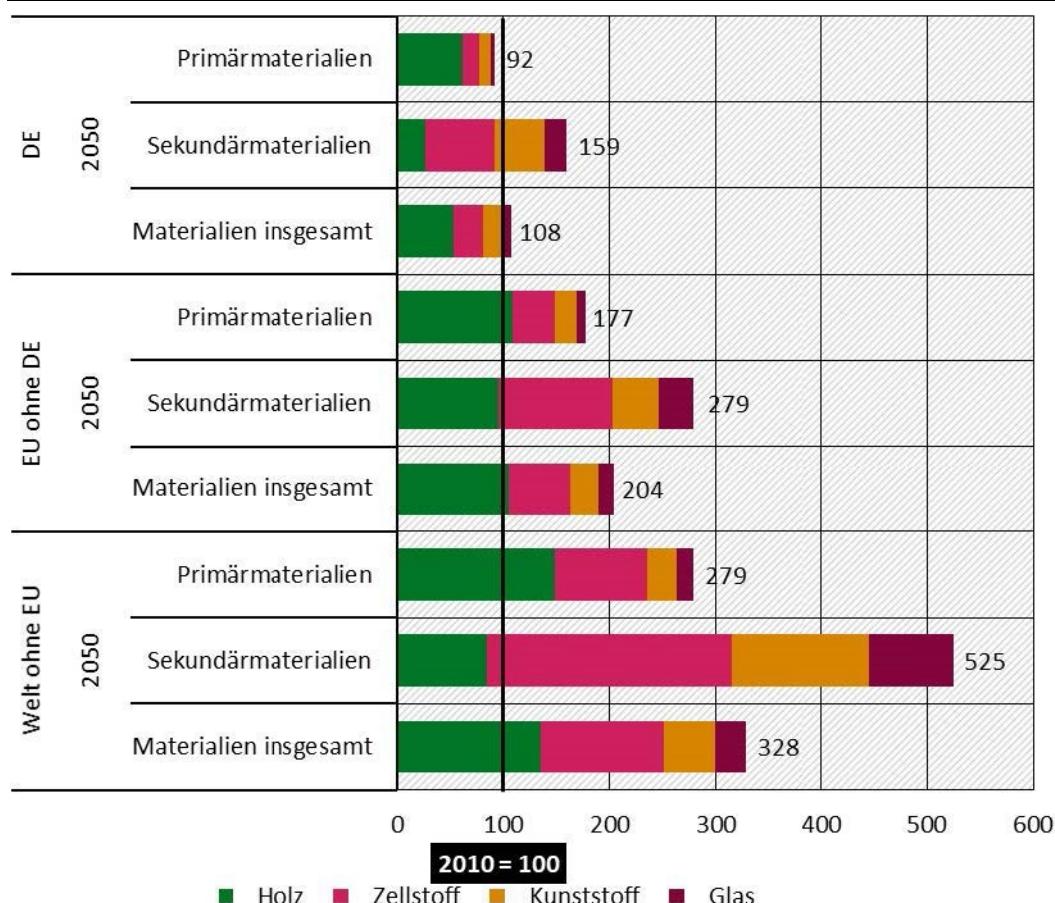
Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Die Nachfrage nach Aluminium sinkt nur in Deutschland um 26 %. In den anderen Regionen kann ein Anstieg um 71 % in EU ohne DE bzw. 229 % in Welt ohne EU beobachtet werden. Dabei steigt der Sekundäranteil auf 64 % bzw. 65 %.

## 5.5.2 Sonstige Materialien

Abbildung 10 und Tabelle 13 zeigen die Entwicklung der Nutzung der Materialien Holz, Zellstoff, Kunststoff und Glas. Die Nutzung der ausgewählten sonstigen Materialien insgesamt entwickelt sich in den untersuchten Regionen unterschiedlich. Es ergibt sich durchgehend ein Anstieg: Deutschland +8 %, EU ohne DE +104 %, Welt ohne EU +228 %. Die Differenzen zwischen den Regionen sind insbesondere durch Unterschiede beim Wachstumseffekt begründet.

**Abbildung 10: Veränderung des Einsatzes ausgewählter Primär- und Sekundärmaterialien 2050 zu 2010 (2010=100) in GreenSupreme**



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Die Differenzierung nach Primär- und Sekundärmaterialien zeigt, ähnlich wie bei Metallen, deutliche Unterschiede bei den Entwicklungen. Die Nutzung von Primärmaterialien insgesamt vermindert sich für DE um 8 %, steigt aber für EU ohne DE (+77 %) und Welt ohne EU (+179 %). Im Vergleich dazu erhöht sich die Nachfrage nach den ausgewählten Sekundärmaterialien für alle drei Regionen deutlich stärker: Deutschland +59 %, EU ohne DE +179 % und Welt ohne EU +425 %. Aufgrund steigender Recyclingraten kommt es zu beträchtlichen Einsparungen von Primärrohstoffen.

**Tabelle 13: Primär- und Sekundärmaterialien in 2010 und in 2050 im Szenario GreenSupreme**

Kumulierter Ressourcengehalt der Güter der letzten inländischen Verwendung in 1000 t

Indikator	Jahr	DE	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>Ausgewählte Materialien insgesamt</b>	<b>2050</b>	<b>68.806</b>	<b>541.753</b>	<b>5.647.750</b>
<b>Primärmaterialien</b>	<b>2050</b>	<b>45.212</b>	<b>344.681</b>	<b>3.851.719</b>
Holz	2050	30.281	211.705	2.051.395
Zellstoff	2050	7.950	76.320	1.203.279
Kunststoff	2050	5.260	40.783	382.833
Glas	2050	1.721	15.872	214.212
<b>Sekundärmaterialien</b>	<b>2050</b>	<b>23.594</b>	<b>197.072</b>	<b>1.796.031</b>
Holz	2050	4.006	67.452	287.921
Zellstoff	2050	9.582	75.931	790.815
Kunststoff	2050	7.041	30.745	446.316
Glas	2050	2.965	22.944	270.980
<b>Ausgewählte Materialien insgesamt</b>	<b>2010</b>	<b>63.987</b>	<b>265.456</b>	<b>1.723.056</b>
<b>Primärmaterialien</b>	<b>2010</b>	<b>49.123</b>	<b>194.719</b>	<b>1.380.758</b>
Holz	2010	26.575	99.055	697.246
Zellstoff	2010	9.495	42.984	361.595
Kunststoff	2010	9.511	34.675	227.442
Glas	2010	3.542	18.006	94.474
<b>Sekundärmaterialien</b>	<b>2010</b>	<b>14.864</b>	<b>70.737</b>	<b>342.299</b>
Holz	2010	2.708	23.054	78.715
Zellstoff	2010	8.993	35.271	204.554
Kunststoff	2010	1.542	5.264	37.055
...Glas	2010	1.620	7.147	21.974

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

## 5.6 Sensitivität Metallrecycling

Zur Einschätzung des Beitrags der zunehmenden Recyclingquoten zur Einsparung von Primärmetall wurde mit dem Modell eine alternative Simulationsrechnung durchgeführt. Für diese Simulation wurde eine Halbierung der für GreenSupreme 2050 unterstellten Recyclingquoten angenommen (vgl. Kap. 4.2.2.2.4).

Die Ergebnisse der Simulation für Deutschland werden in Tabelle 14 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Simulation zum Ziel hat, den Einfluss einer Variation der RC-Quoten auf den

zentralen Rohstoffindikator RMC (kumulierter Primärrohstoffkonsum) abzuschätzen. Die Ergebnisse werden deshalb aus Gründen der Vergleichbarkeit in t RME dargestellt und nicht in Tonne Metallgehalt, wie in Tabelle 12.

**Tabelle 14: Veränderung Primärrohstoffbedarf in der Sensitivität „Verminderung der RC-Quoten um 50 % - Deutschland 2050 (in 1000 t RME)**

Rohstoff	Supreme	Sensitivität	Differenz
Metallerze insgesamt	51.968	79.803	27.835
Eisen	11.062	22.810	11.747
Kupfer	6.028	8.980	2.952
Nickel	424	1.279	855
Blei	217	1.485	1.268
Zink	1.004	3.086	2.082
Zinn	783	783	0
Gold	22.257	30.205	7.948
Silber	822	999	177
PGM	2.644	2.961	317
Bauxit	2.257	2.746	489
Lithium	2	3	1
Andere Metalle	4.468	4.467	-1

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Tabelle 14 zeigt, dass eine Halbierung der für GreenSupreme 2050 unterstellten Sekundärmetallanteile den RMC um rund 28 Mio. t RME erhöhen würde. Die einzelnen Metalle liefern folgende (gerundeten) Beiträge: Eisen 12 Mio. t RME, Gold 8 Mio. t RME, Kupfer 3 Mio. t RME, Zink 2 Mio. t RME, alle übrigen Metalle zusammen rund 3 Mio. t RME. Der Gesamteffekt (alle Metalle zusammen) würde einen Anstieg des RMC für Metallerze von 54 % bewirken. Der RMC insgesamt würde sich um 4,5 % erhöhen.

## 5.7 Vergleich der Szenarien

In den bisherigen Kapiteln wurde der Fokus auf GreenSupreme gelegt. In diesem Kapitel werden die weiteren Szenarien GreenLate und H<sub>2</sub> aufgegriffen und die Unterschiede zu GreenSupreme beleuchtet. Wie bereits erwähnt (siehe Kapitel 3), erreichen alle drei Szenarien bis zum Jahr 2050 Treibhausgasneutralität, folgen dabei aber unterschiedlichen Transformationspfaden. GreenSupreme stellt das ambitionierteste der Szenarien dar, in dem die Transformation vergleichsweise früh und weitgreifend einsetzt. In GreenLate erfolgt die Transformation in geringerem Tempo und zu großen Teilen erst gegen Ende der ersten Jahrhunderthälfte. Das H<sub>2</sub>-Szenario beschreibt ebenfalls eine ambitionierte Transformation, legt aber im Vergleich zu GreenSupreme einen starken Fokus auf die Nutzung von Wasserstofftechnologien.

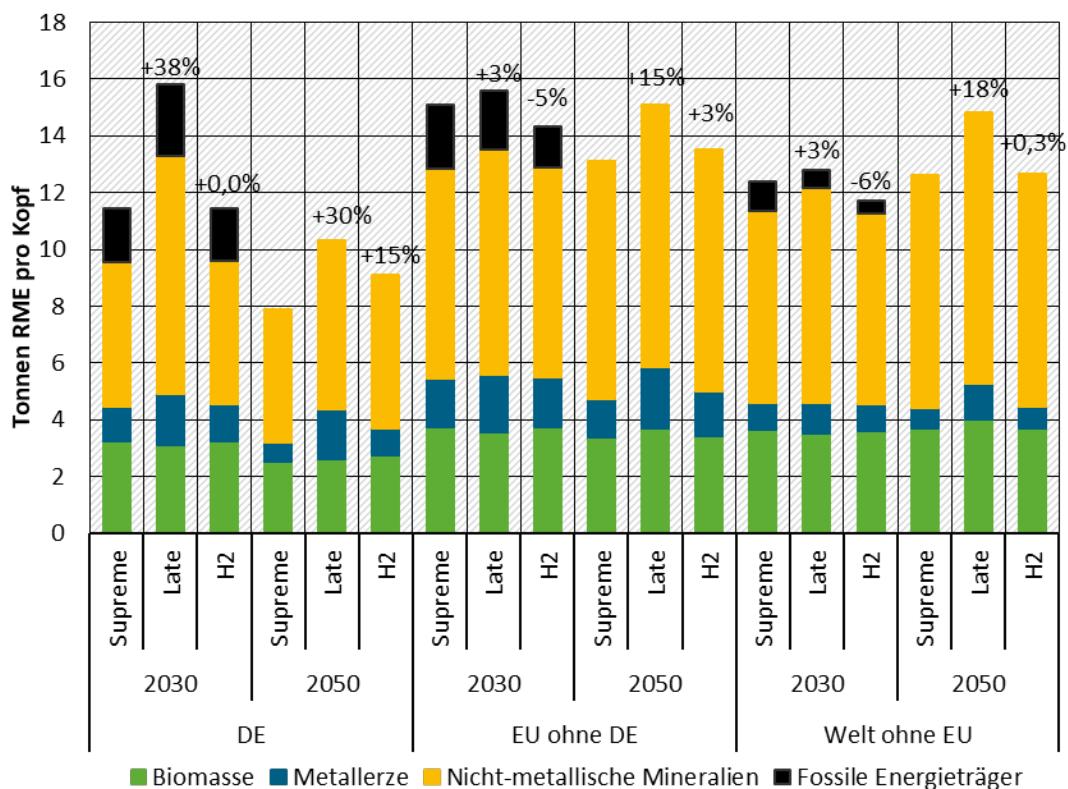
Abbildung 11 zeigt den Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf für die verschiedenen Szenarien. Im Szenario GreenLate ist der Rohstoffkonsum über alle Regionen und Jahre hinweg höher als in

GreenSupreme. Am größten sind die Unterschiede für Deutschland mit einem Unterschied von 38 % in 2030 und von 30 % in 2050. Ein Teil der Differenz lässt sich mit dem Unterschied bei den Wachstumsannahmen erklären: Im Szenario GreenLate wird bis 2050 für Deutschland eine Steigerung des BIP um 33 % angenommen, während die Steigerung in GreenSupreme (und dem H<sub>2</sub>-Szenario) nur 20 % beträgt (siehe Tabelle 2). Für die beiden anderen Regionen gibt es keine Variation bei den Wachstumsannahmen. Der Unterschied liegt daher nur bei 15 % bzw. 18 % in 2050.

Im H<sub>2</sub>-Szenario sind die Unterschiede entsprechend der gleichen Wachstumsannahmen deutlich geringer. 2030 ist der Primärrohstoffgehalt in EU ohne Deutschland und Welt ohne EU sogar etwas niedriger (-5 % bzw. -6 %) als in GreenSupreme. Im Jahr 2050 ist der RMC allerdings über alle Regionen hinweg höher. Für Deutschland liegt der Unterschied bei 15 %, für die beiden anderen Regionen bei geringeren 3 % (EU ohne DE) bzw. 0,3 % (Welt ohne EU).

**Abbildung 11: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf im Szenarienvergleich**

Veränderung gegenüber GreenSupreme in %



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Tabelle 15 zeigt den weltweiten Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien als Anteil am RMC. Es wird deutlich, dass der Bedarf im GreenLate-Szenario im Jahr 2050 anteilmäßig deutlich höher ist als in den beiden anderen Szenarien, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass die Investitionen in GreenLate zeitlich deutlich später erfolgen und damit im Jahr 2050 mehr Zubau notwendig ist. Im H<sub>2</sub>-Szenario sind die Anteile im Verhältnis zu GreenSupreme leicht erhöht. Für Blei und Kupfer übersteigen die Anteile diejenigen des GreenLate-Szenarios; in absoluten Zahlen fallen die Bedarfe im H<sub>2</sub>-Szenario aber dennoch geringer aus.

**Tabelle 15: Weltweiter Bedarf an Primärrohstoffen für die Investitionen in Schlüsseltechnologien im Jahr 2050**

Anteil am RMC in %

	GreenSupreme	GreenLate	H <sub>2</sub>
<b>Primärrohstoffe insgesamt</b>	<b>1,4</b>	<b>2,4</b>	<b>1,6</b>
Biomasse	0,5	0,6	0,6
Metallerze	12,8	17,8	15,6
Eisen	6,6	9,3	7,8
Kupfer	14,3	14,8	18,2
Blei	9,5	9,0	12,1
Zink	7,3	8,7	9,7
Aluminium	10,0	22,1	13,6
Lithium	5,0	7,8	6,8
Gold	10,6	15,7	13,7
Silber	19,1	26,1	24,0
Platingruppenmetalle	1,1	2,1	1,5
Nickel	21,8	28,4	21,2
Sonstige Metalle	33,1	50,0	37,4
Nicht-metallische Mineralien	0,7	1,0	0,8
Fossile Energieträger	0,0	0,0	0,0

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

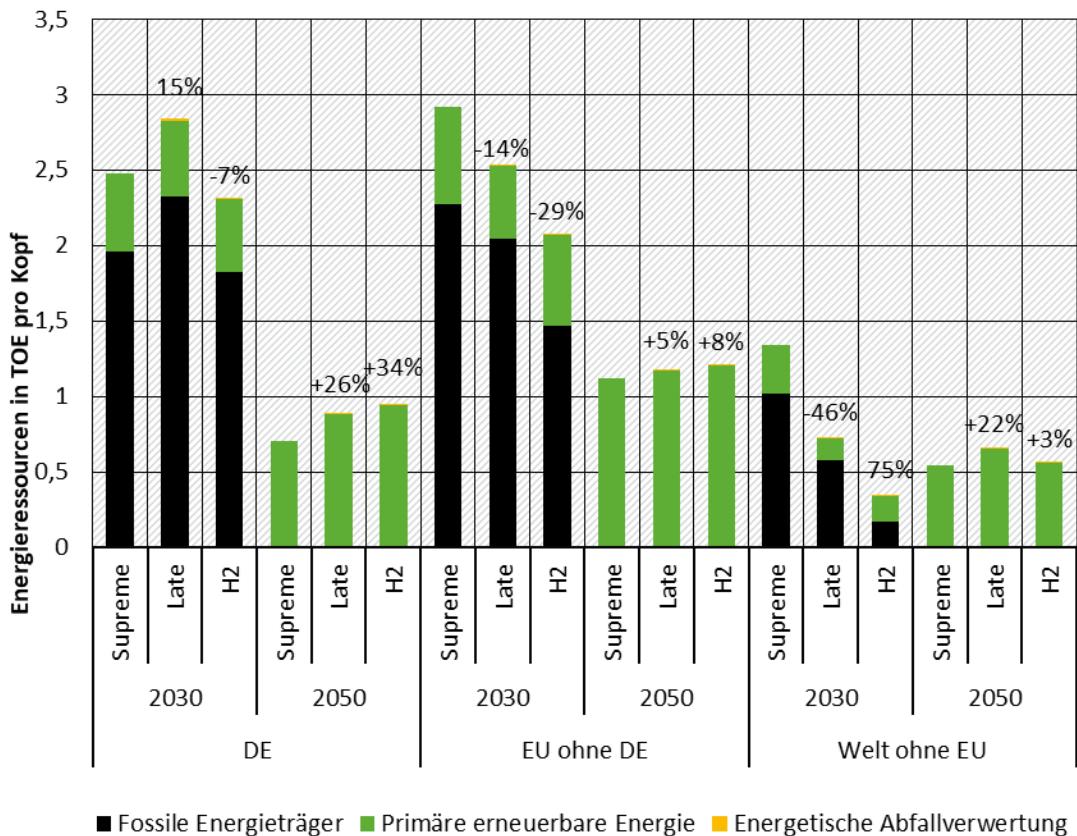
Abbildung 12 zeigt den kumulierten Energieaufwand für die Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung in TOE pro Kopf für die verschiedenen Szenarien. Für Deutschland und EU ohne DE sinkt der Bedarf an Energieressourcen von 2030 bis 2050 in allen Szenarien. In der Welt ohne EU fällt dagegen der Energieressourcenbedarf nur in GreenSupreme deutlich, während in GreenLate der Wegfall fossiler Energieträger annähernd durch den Ausbau erneuerbarer Energien ausgeglichen und im H<sub>2</sub>-Szenario sogar durch erneuerbare Energien überkompensiert wird.

Der Bedarf an Energieressourcen pro Kopf liegt in 2030 in allen Regionen im H<sub>2</sub>-Szenario am niedrigsten. Am größten ist dieser Unterschied mit -75 % in der Welt ohne EU (-7 % in Deutschland, -29 % in EU ohne DE). Die Welt ohne EU ist dabei auch die einzige Region, in der der Energieressourcenbedarf 2050 in GreenLate am höchsten liegt (+ 22 %), während in Deutschland und EU ohne DE das H<sub>2</sub>-Szenario 2050 den höchsten Energieressourcenbedarf hat (+34 % Deutschland, +8 % EU ohne DE). Nach dem Wegfall fossiler Energieträger und dem Ausbau erneuerbarer Energieträger weist das H<sub>2</sub>-Szenario 2050 dagegen den höchsten Energieressourcenbedarf in Deutschland auf (+34 %), gefolgt von GreenLate (+26 %). Dies liegt einerseits daran, dass im H<sub>2</sub>-Szenario für Deutschland höhere Verkehrsleistungen angenommen werden; andererseits ist der Energieressourcenbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario durch die verstärkte

Nutzung von Wasserstoff statt Strom wie in den GreenSzenarien höher, bedingt durch die damit einhergehenden Konversionsverluste.

**Abbildung 12: Energieressourcen pro Kopf im Szenarienvergleich**

Ohne Energie aus primärer Biomasse, Veränderung gegenüber GreenSupreme in %

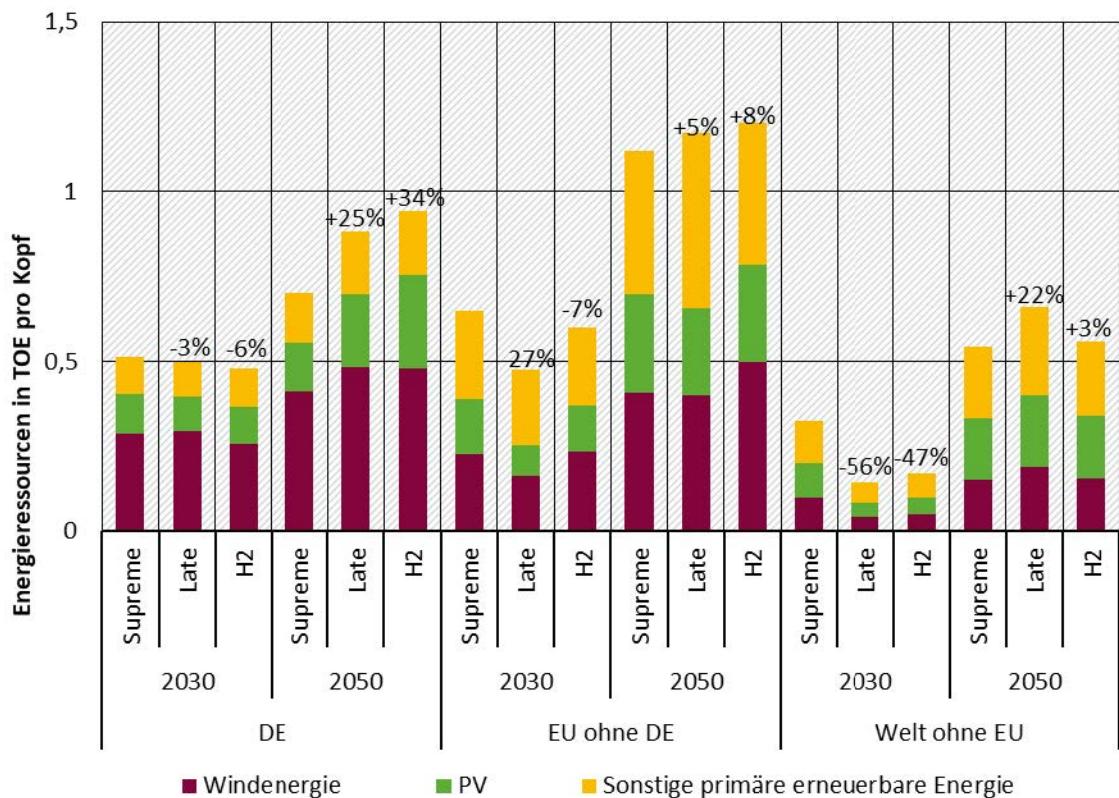


Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Abbildung 13 zeigt den kumulierten Energiegehalt der Güter an primären erneuerbaren Energieressourcen für die verschiedenen Szenarien. Aufgrund des schnellen Ausbaus in GreenSupreme ist 2030 der Pro-Kopf-Bedarf an erneuerbaren Energieressourcen für alle Regionen in GreenSupreme am höchsten. Während der Unterschied in Deutschland nur gering ausfällt (-3 % in GreenLate, -6 % im H<sub>2</sub>-Szenario), liegen die beiden anderen Szenarien in der Welt ohne EU 2030 um etwa die Hälfte niedriger (-56 % GreenLate, -47 % H<sub>2</sub>-Szenario). Dieses Verhältnis dreht sich bis 2050 um, so dass hier der Bedarf an erneuerbaren Energieressourcen in GreenSupreme über alle Regionen hinweg am niedrigsten liegt. Besonders stark ist der Unterschied in Deutschland (+25 % GreenLate, +34 % H<sub>2</sub>), während in den anderen Regionen besonders das GreenLate-Szenario mit + 22 % heraussticht (+3 % H<sub>2</sub>). Auffällig ist außerdem, dass der erneuerbare Energieressourcenbedarf pro Kopf nur in Deutschland in allen Jahren deutlich von Windenergie dominiert wird, während sich die erneuerbaren Energieressourcen in den beiden anderen Regionen gleichmäßiger auf Windenergie, PV und Sonstige verteilen.

**Abbildung 13: Primäre erneuerbare Energieressourcen pro Kopf im Szenarienvergleich**

Veränderung gegenüber GreenSupreme in %

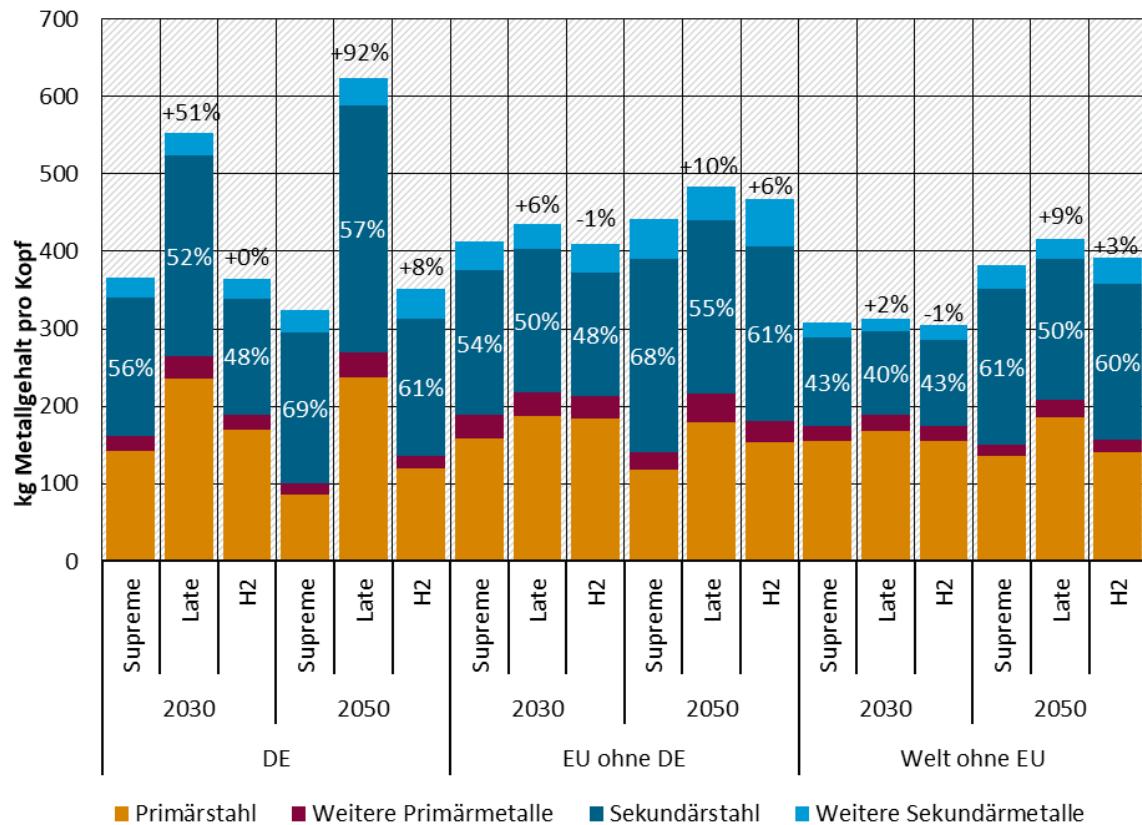


Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Abbildung 14 zeigt den kumulierten Gehalt ausgewählter Primär- und Sekundärmetallressourcen der Güter der letzten inländischen Verwendung pro Kopf für die verschiedenen Szenarien. In Deutschland weist das GreenLate-Szenario den höchsten Bedarf an Metallen auf, sowohl in 2030 (+ 51 %), als auch 2050 (+92 %). In beiden Jahren hat Deutschland in GreenLate damit den deutlich höchsten Pro-Kopf-Metallbedarf aller Regionen. Das H<sub>2</sub>-Szenario unterscheidet sich im Pro-Kopf-Metallbedarf 2030 in Deutschland nicht (+0%) und 2050 nur leicht (+8 %) von GreenSupreme. Bis 2050 steigen die Anteile an Sekundärstahl in GreenSupreme und im H<sub>2</sub>-Szenario um jeweils 13 Prozentpunkte, während sie in GreenLate nur leicht um 5 Prozentpunkte steigen.

**Abbildung 14: Einsatz ausgewählter Primär- und Sekundärmetalle (Eisen, Kupfer, Blei, Zink, Aluminium und Lithium) pro Kopf im Szenarienvergleich**

Veränderung gegenüber GreenSupreme in % und Sekundärmetallanteil in %



Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

Sowohl in der EU ohne DE als auch der Welt ohne EU liegt der Metallbedarf pro Kopf im GreenLate-Szenario in beiden Jahren ebenfalls am höchsten. Allerdings ist der Unterschied zu den anderen Szenarien deutlich weniger ausgeprägt als in Deutschland: In EU ohne DE steigt die Differenz zu GreenSupreme von +6 % auf +10 %, während sie in der Welt ohne EU von +2 % auf +9 % steigt.

In der Region Welt ohne EU sind vor allem im GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenario starke Steigerungen der Sekundärstahlanteile zwischen 2030 und 2050 zu beobachten: 18 Prozentpunkte in GreenSupreme und 17 Prozentpunkte im H<sub>2</sub>-Szenario, dagegen nur 10 Prozentpunkte in GreenLate.

## 5.8 Zwischenfazit URMOD-3R

Das umweltökonomischen Ressourcenmodell URMOD-3R liefert für die drei Szenarien, Regionen und Stützjahre detaillierte Ergebnisse zum gesamtwirtschaftlichen Primärrohstoffkonsum, zu den benötigten Energieressourcen und zum Sekundärrohstoffeinsatz. Für das ambitionierte Szenario GreenSupreme sowie drei Regionen und je drei Stützjahre wurden in dem vorherigen Kapitel diverse Aspekte detailliert beleuchtet und mit den Entwicklungen im GreenLate und H<sub>2</sub>-Szenario verglichen.

Wichtige Kernaussagen für das **Szenario GreenSupreme** werden nachfolgend nochmal zusammengefasst:

- ▶ Die Entwicklung des Primärrohstoffkonsums (RMC) pro Kopf bis 2050 verläuft in den Regionen unterschiedlich. Deutschland startet 2010 mit einem hohen Ausgangswert von 17,4 t RME und reduziert diesen bis 2050 stark um 55 % auf 7,9 t RME pro Kopf. In EU ohne DE geht der Rohstoffkonsum bis ins Jahr 2050 nur um 17 % auf 13,1 t RME pro Kopf zurück. In der Welt ohne EU ist die Entwicklung gegensätzlich und der RMC pro Kopf steigt um 15,26 % auf 14,83 t RME pro Kopf.
- ▶ Die Unterschiede in den Regionen lassen sich vor allem mit den unterschiedlichen Ausgangsniveaus und Annahmen zur wirtschaftlichen Entwicklung erklären. Für den starken Rückgang des RMC pro Kopf für Deutschland ist vor allem eine schwächere Entwicklung des BIP pro Kopf verantwortlich. Das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts von 2010 bis 2050 liegt für Deutschland bei 20 %, während es in den anderen beiden Regionen annahmenbedingt bei 91 % (EU ohne DE) bzw. 258 % (Welt ohne EU) liegt.
- ▶ Im betrachteten Zeitraum verschieben sich die Anteile der genutzten Primärrohstoffe in den beiden Hauptkategorien (Konsum und Investitionen) der letzten inländischen Verwendung am RMC. Der Anteil der besonders rohstoffintensiven Investitionen in Bauten steigt in allen drei Regionen, während der Anteil des Konsums zurückgeht, insbesondere in Welt ohne EU.
- ▶ In Deutschland sinkt die letzte inländische Verwendung von Primärmetall um fast 70 % auf 52 Mio. t RME, in der EU ohne DE sinkt die Verwendung moderater (-26 %). In der Welt ohne EU hingegen kommt es zu einer Zunahme auf 6,7 Mrd. t RME (+22 %). In Anbetracht des angesetzten Wirtschaftswachstums ist diese Steigerung aber als moderat einzustufen.
- ▶ Im Gegensatz zu den Metallen steigt der Materialeinsatz bei sonstigen Materialien (Holz, Zellstoff, Kunststoff und Glas) insgesamt bis 2050 in allen Regionen: Deutschland +8 %, EU ohne DE +104 %, Welt ohne EU +228 %. Gleichzeitig steigt der Einsatz von Sekundärmaterial stark: Deutschland +59 %, EU ohne DE +179 %, Welt ohne EU +240 %, wodurch es auch hier zu deutlichen Einsparungen an Primärressourcen kommt. 32,2 % des weltweiten Materialbedarfs dieser Materialien können 2050 durch Sekundärmaterialien gedeckt werden, was eine Steigerung von knapp 12 Prozentpunkten im Vergleich zu 2010 bedeutet.
- ▶ Durch Modellsimulationen können die Auswirkungen der Nachfrageänderung und der Technologieänderung auf den Primärrohstoffkonsum (RMC) isoliert betrachtet werden. Die Technologieänderung hat für alle drei Regionen einen deutlich entlastenden Einfluss auf den RMC. Der Nachfrageeffekt hingegen zeigt unterschiedliche Auswirkungen in den Regionen: Für Deutschland liegt der Effekt bei nahezu null, für die anderen beiden Regionen steigt der Primärrohstoffkonsum durch die zunehmende Nachfrage deutlich (EU ohne DE +65 % und Welt ohne EU +184 %).

Detaillierte Tabellen mit Ergebnissen für alle Szenarien und Jahre und einer Gliederung nach 54 Rohstoffen finden sich in einem separat veröffentlichten Excel-Anhang.

#### **Vergleich der Berechnungsergebnisse für den RMC von REFINE und RESCUE**

Die grundsätzlichen Ergebnisse der RESCUE-Studie für Deutschland können in REFINE mit dem neuen URMOD-3R-Modell bestätigt werden. Durch die methodische Weiterentwicklung und eine Aktualisierung der Annahmen (beispielsweise einer Berücksichtigung der tatsächlichen BIP-Entwicklung für die Periode von 2010 bis 2022) kommt es allerdings für Deutschland zu Abweichungen bei den Ergebnissen für den zentralen Indikator RMC (primärer Rohstoffaufwand).

So liegt das Ergebnis aus dem REFINE Projekt für den zentralen Indikator RMC für das Szenario GreenSupreme im Jahre 2050 bei 624 Mio. t. Der entsprechende Wert aus dem RESCUE-Modell lag um rund 30 % niedriger. Die Differenz ist auf drei grundlegende Faktoren zurückzuführen: Revision einiger Ausgangsdaten für das Basismodell 2010, methodische Weiterentwicklung des Schätzmodells und Überarbeitung von Szenario-Annahmen.

Ein großer Teil des Unterschiedes lässt sich allein durch die Änderung der Annahme für das BIP-Wachstum (+20 % statt 0 %) erklären. In die gleiche Richtung wirken sich Änderungen bei den Recyclingquoten aus. Bei RESCUE waren die RC-Quoten noch exogen festgelegt worden. Dem gegenüber wurde bei REFINE ein Abgleich vorgenommen mit den Ergebnissen einer Abschätzung der Menge an Sekundärrohstoffen, die nach der Nutzungsphase unter Berücksichtigung von Verlusten überhaupt wieder zur Verfügung stehen werden. Recycling von Baurohstoffen konnte bei dem 3-Regionen Modell aus Gründen der Vergleichbarkeit nicht berücksichtigt werden, weil Angaben für die übrige EU und die übrige Welt nicht zur Verfügung standen. Weitere Effekte ergaben sich durch den Übergang von einem „Ein-Ländermodell“ für Deutschland zu einem voll integrierten mutiregionalen und auch sektorale weiter ausdifferenzierten IOT-Modell. Die Weiterentwicklung des methodischen Ansatzes schlägt sich insbesondere als eine Änderung der Produktionstechnologie nieder. Ferner wurden über die oben genannte Änderung der Wachstumsannahme teilweise Szenario-Vorgaben bezüglich der Entwicklung der Endnachfrage auf der Grundlage einer verbesserten empirischen Fundierung überarbeitet.

Im folgenden Kapitel wird die gesamtökonomische Betrachtung durch eine auf angepassten ecoinvent Datensätzen basierende Betrachtung ergänzt, die sich auf die Schlüsseltechnologien fokussiert.

## 6 Rohstoffe in den Schlüsseltechnologien

### 6.1 Vorgehen zur Berechnung der Rohstoffe für Schlüsseltechnologien

Die Rohstoff- und Materialbedarfe für die ausgewählten Schlüsseltechnologien konnten basierend auf dem Ökobilanzmodell ausgewertet werden, das für REFINE auf Basis der ecoinvent Datenbank v3.7.1 generiert wurde (siehe (Dittrich et al. 2024b)). Die Berechnungen mit den angepassten Datenbanken des Ökobilanzmodells liefern spezifische Ergebnisse je Einheit Produkt (Dienstleistung) für die drei Szenarien, für die Stützjahre 2030, 2040, 2050 und für die drei Regionen Deutschland (DE), Europa ohne Deutschland (EU ohne DE, bzw. RoE) und Welt ohne Europa (Welt ohne EU, bzw. RoW) in REFINE. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die von (Teske et al. 2019) genutzten Regionen „OECD Europe“ und „World“. Während in URMOD-3R die EU-28 (einschließlich Großbritannien) betrachtet wurde, besteht die für den folgenden Bottom-up-Ansatz genutzte Region „EU ohne DE“ hier aus den europäischen OECD-Ländern ohne Deutschland.<sup>20</sup>

Für die Darstellung der Rohstoffbedarfe der Schlüsseltechnologien wurden von ecoinvent Datensätze auf Basis des angepassten Ökobilanzmodells ausgewertet und bereitgestellt. Die Datensätze beziehen sich je nach Schlüsseltechnologie auf eine kWh erzeugten Strom, auf eine Masseneinheit Produkt oder eine Gesamtanlage. Für die Auswertung hat ecoinvent eine abgestimmte Liste an Rohstoffen und Materialien (gesamt etwa 270) berücksichtigt. In der Auswertung wurden die Prozessketten (Lebenswege) für die Schlüsseltechnologien bis zu dem Punkt zurückverfolgt, bis in den Datensätzen keine relevanten Zwischenprodukte/Halbzeuge mehr enthalten waren und der Gesamtinput auf die vorgegebenen Grundstoffe zurückgeführt werden konnte. Für die Ergebnisauswertung wurden die Materialien zusammengefasst. Das Hauptaugenmerk der Auswertung liegt auf Primärmetallen, mineralischen Rohstoffen und Kunststoffen. Schrottmengen wurden für die Inanspruchnahmen nicht berücksichtigt<sup>21</sup>. Allerdings verbleiben mit diesem Vorgehen Datenunsicherheiten, da eine Auswahl getroffen und Abschneidekriterien gesetzt werden mussten.

Eine direkte Auswertungsmöglichkeit von Rohstoff- bzw. Materiallisten aus der ecoinvent Matrix bestand zunächst nicht bzw. waren rohstoff- oder materialbezogene Ergebnisse nicht oder nur eingeschränkt auswertbar. Der Fokus der ecoinvent Datenbank liegt auf einer Zuordnung von Umweltlasten (Inputressourcen, Emissionen) nach einem konsistenten Zuordnungsschema. Letzteres bedingt auch, dass Metallgehalte in Erzen bei vergesellschafteten Metallen ebenfalls ökonomisch aufgeteilt werden und nicht nur die Gangartmineralien (Erzkörper)<sup>22</sup>, so dass eine direkte Auswertung der Metallgehalte „in ground“ auch nicht möglich war. Im späteren Verlauf des Projektes konnten hier Lösungsansätze für Metallrohstoffe entwickelt werden, indem für Primär- und Sekundärmetalle neue Informationsflüsse ergänzt wurden (Liebich et al. 2023). Diese können direkt ausgewertet werden. Ähnliche Ansätze sind gegebenenfalls auch für andere Materialgruppen wie Kunststoffe oder Baustoffe möglich. Für REFINE konnte dies jedoch noch nicht umgesetzt werden. Daher wurde das oben beschriebene Vorgehen beibehalten.

---

<sup>20</sup> Die Region EU ohne DE bzw. RoE besteht hier aus den folgenden Ländern: Österreich, Belgien, Tschechische Republik, Dänemark, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Ungarn, Island, Irland, Italien, Israel, Luxemburg, den Niederlanden, Norwegen, Polen, Portugal, Slowakai, Slowenien, Spanien, Schweden, der Schweiz und Großbritannien.

<sup>21</sup> Der Aspekt Recycling ist über die neu ermittelten Sekundäranteile und die Sensitivität hierzu adressiert (vgl. Kap. 4.2.2.2.3 und Kap. 4.2.2.2.4).

<sup>22</sup> Für den Kumulierten Rohstoffaufwand (KRA) Metalle, der als Umweltindikator auch für REFINE ausgewertet wurde (siehe Teilbericht Umweltwirkungen (Dittrich et al. 2024b)), spielt dies keine Rolle, da darin wieder alle Metalle addiert sind.

Die von ecoinvent übermittelte Datei mit Rohstoff- bzw. Materiallisten für die Schlüsseltechnologien wurde für die Ergebnisdarstellung grundsätzlich nach den in Tabelle 16 aufgelisteten Materialien ausgewertet.

**Tabelle 16: Auswahl der betrachteten Materialien**

Metalle	Nicht-metallische mineralische Baustoffe	Sonstige
Eisen, Stahl	Siliziumsand	Kunststoffe
Aluminium	Sand	Dämmstoffe
Kupfer	Beton, Zement	Sonstige
Gold	Graphit	
Zink		
Zinn		
Blei		
Nickel		
Kobalt		
Silber		
Tantal		
Siliziummetall		
Lithium		
Indium		
Vanadium		

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Je nach auswertbaren Mengen wurden kleinere Mengenanteile z. B. bei Metallen auch unter „sonstige Metalle“ zusammengefasst.

Zur Berechnung der Rohstoffbedarfe wurden zunächst die benötigten Kapazitäten der Schlüsseltechnologien auf Basis der Szenario-Daten für alle Szenarien, Jahre und Regionen berechnet. Diese wurden, entsprechend der Gliederung des ecoinvent-Datensatzes, nach erzeugtem Strom, Masseeinheit des Produkts oder der Anzahl der benötigten Anlagen aufbereitet. Die berechneten Kapazitäten der Schlüsseltechnologien sind in Anhang A abgebildet. Im Anschluss wurden die spezifischen Rohstoffbedarfe der Schlüsseltechnologien je Einheit ihrer Bezugsgröße aus dem ecoinvent-Datensatz ausgelesen und mit den entsprechenden Kapazitäten skaliert, um den absoluten Rohstoffbedarf einer Schlüsseltechnologie für das

entsprechende Jahr, Szenario und Region abzubilden. Für die Berechnung der Kapazitäten der Schlüsseltechnologien wurde auf verschiedene Datenquellen zurückgegriffen (siehe Kapitel 2). Um die unterschiedlichen Modellierungsansätze zu kombinieren, mussten daher im Einzelnen ergänzende Annahmen getroffen werden. Zusätzlich wurden die Stromerzeugungskapazitäten in den Regionen leicht angepasst, um dem Umstand gerecht zu werden, dass in den REFINE-Szenarien PtX-Produkte zum Teil als Importe deklariert werden, welche in der ursprünglichen Modellierung der Regionen (Teske et al. 2019) heimisch produziert wurden.

In den folgenden Kapiteln 6.2 bis 6.16 werden die Ergebnisse zu den spezifischen und absoluten Rohstoff- und Materialaufwendungen der Schlüsseltechnologien (ST) präsentiert.

Die Auswahl der in REFINE untersuchten Schlüsseltechnologien ist in Tabelle 17 abgebildet.

**Tabelle 17: Auswahl der betrachteten Schlüsseltechnologien**

Strom- und Wärme	Power-to-X
Windenergie, onshore und offshore	Elektrolyse
Phtovoltaik, Dachanlagen und Freiflächenanlagen	Methanisierung
Wärmepumpen	Methanolsynthese
Solarthermische Kraftwerke (Solarturm u. Parabolrinne)	FT-Synthese
Brennstoffzellen	CO2-Bereistung
Geothermie	Meerwasserentsalzungsanlagen
Energiespeicher	

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Nicht eingenommen sind Stromnetze. Hier entsprechen die Datensätze für Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetze dem Originaldatensatz aus ecoinvent, der für REFINE nicht angepasst wurde (siehe (Dittrich et al. 2024b)). Hinzu kommt, dass für die Hochrechnung auf absolute Bedarfe in den Szenarien, Regionen und Jahren keine Datenangaben zu Leitungsbedarfen verfügbar sind. Letzteres gilt analog für strombasierte Antriebssysteme, die ebenfalls exkludiert wurden. Bezogen auf die gesamten Rohstoff- und Materialbedarfe der Schlüsseltechnologien wird der dadurch nicht abgebildete Anteil als niedrig eingeschätzt (ähnliche Größenordnung wie bei Brennstoffzellen).

In den nachfolgenden einzelnen Kapiteln werden zunächst einführende Informationen zu jeder Schlüsseltechnologie gegeben. Detaillierte technische Parameter wie etwa die angenommenen Lebensdauern der Anlagen und Volllaststunden etc. sind im Teilbericht Umweltwirkungen (Dittrich et al. 2024b) dokumentiert.

Darauf folgt im Unterkapitel „Rohstoffe in ST“ jeweils die Auswertung der spezifischen Rohstoffbedarfe je Einheit Produkt (Dienstleistung) für die drei Szenarien, die drei Stützjahre 2030, 2040, 2050 und die drei Regionen Deutschland (DE), EU ohne DE (RoE) und Welt ohne EU (RoW). Daran anschließend werden im Unterkapitel „Rohstoffe pro Szenario“ die absoluten Rohstoffbedarfe ebenfalls für alle Szenarien, Jahre und Regionen illustriert und erläutert.

Im zusammenfassenden Kapitel 6.17 wird die Gesamtrohstoffnachfrage über alle hier betrachteten Schlüsseltechnologien dargestellt und differenziert nach Technologie und Rohstoffen ausgewertet. Zudem werden auch die Rohstoffaufwendungen, die durch PtX-Importe nach Deutschland und EU ohne DE anfallen, in einem separaten Kapitel betrachtet.

## 6.2 Windenergieanlagen onshore

Windenergieanlagen (WEA) nehmen einen Teil der kinetischen Windenergie auf, wandeln diese in mechanische Rotationsenergie und schließlich mittels eines Generators in elektrische Energie um. Da auf der windabgewandten Seite stets eine ausreichende Windgeschwindigkeit zum Abfließen der Luft vorhanden sein muss, können von WEA höchstens 59 % der Windenergie aufgenommen werden. In den zur Stromerzeugung relevanten WEA kommen heutzutage ausschließlich Auftriebsläufer zum Einsatz, welche durch eine winklige Anstellung von Flügeln Auftrieb erzeugen. Die Flügel, die den Rotor bilden, drehen sich bei Auftriebsläufern um eine horizontale Achse. Um stets eine frontale Anströmung der Flügel zu gewährleisten, werden diese mittels Elektromotoren oder hydraulisch der Windrichtung nachgeführt (Zahoransky et al. 2010).

Eine Windenergieanlage besteht aus rund 25.000 Bauteilen, die in mehrere Hauptsysteme wie Turm, Gondel und Rotor unterteilt sind (European Commission et al. 2020; Vestas 2017). Der Rotor besteht aus Blättern, einer Nabe und einem Blattverstellsystem. Er ist mit der Gondel verbunden, die wiederum mit dem Turm verbunden ist. Die Gondel enthält viele der elektrischen und mechanischen Komponenten, einschließlich der Hauptwelle, des Getriebes, des Generators und der Steuersysteme. Der Turm besteht aus großen Stahlrohrprofilen, die an einem Ankerteil befestigt und auf einem Fundament errichtet werden. Der Turm macht einen beträchtlichen Teil der gesamten Windenergieanlage aus, sowohl in Bezug auf die Größe als auch auf die Masse. Der größte Teil der Masse entfällt mit 75 % aber auf das Fundament. Bei der Turbine allein (ohne Berücksichtigung des Fundaments) machen die Gondel und der Rotor jeweils etwa 20 % des Gewichts der Turbine aus. (European Commission et al. 2020; Vestas 2017)

### 6.2.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 18 zeigt den Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus einer Onshore-Windenergieanlage (Onshore-WEA). Die Rohstoffbedarfe basieren auf dem Modul „electricity production from Wind, onshore“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Die Bedarfe variieren über die Jahre, Regionen und Szenarien entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Die hier angenommenen Leistungen der Onshore-Windenergieanlagen unterscheidet sich nach Szenario und Jahr (siehe (Dittrich et al. 2024b)). Für 2030 liegt die angenommene Leistung einer Anlage bei 4,2 MW (GreenLate) bzw. 5,5 MW (GreenSupreme / H<sub>2</sub>-Szenario). Im Vergleich dazu lag die durchschnittlichen Leistung von Onshore-Windenergieanlagen in 2022 zwischen 2,6 und 4,8 MW in 2022 (IRENA 2023).

Für die Produktion einer kWh Strom aus Windenergieanlagen fallen Rohstoffbedarfe an, die sich (je nach Szenario, Jahr und Region) zu 42-63 % aus Sand und Kies, zu 23-39 % aus Beton, zu 11-16 % aus Eisen und Stahl und zu knapp je 1 % aus Aluminium und Kunststoffen und sonstigen Metallen zusammensetzen. Weitere kleinere Anteile entfallen auf Kupfer, Asphalt und sonstige Rohstoffe. Die sonstigen Metalle umfassen u. a. Chrom, Nickel, Zinn, Silber, Blei, Zink, Gold und Tantal.

Im Jahr 2050 fällt der spezifische Bedarf in Deutschland im GreenSupreme-Szenario am höchsten aus und sinkt gegenüber 2030 um 35 %. In der Region EU ohne DE liegt der höchste Bedarf im Jahr 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario bei 29,6 g/kWh und nimmt hingegen, verglichen mit dem Jahr 2030, um 10 % zu. In der Welt ohne EU liegt der höchste spezifische Rohstoffbedarf im Jahr 2050 im GreenSupreme-Szenario bei rund 30 g/kWh. Gegenüber 2030 ist auch in dieser Region bzw. in diesem Szenario eine leichte Zunahme von 10 % zu beobachten.

**Tabelle 18: Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus Onshore-WEA**

Szenario	Re-gion	Jahr	Eisen und Stahl	Alu-minium	Kupfer	sonstige Metalle	Kunst-stoffe	Sande und Kiese	Asphalt	Beton	Sons-tige
H <sub>2</sub>	DE	2030	3,49	0,13	0,08	0,19	0,17	13,66	0,03	8,11	0,06
H <sub>2</sub>	RoE	2030	3,07	0,12	0,07	0,17	0,15	12,02	0,03	7,13	0,05
H <sub>2</sub>	RoW	2030	4,10	0,15	0,10	0,23	0,20	16,05	0,04	9,52	0,07
H <sub>2</sub>	DE	2040	4,03	0,14	0,08	0,23	0,16	12,60	0,03	9,57	0,06
H <sub>2</sub>	RoE	2040	3,74	0,13	0,07	0,21	0,15	11,70	0,03	8,89	0,05
H <sub>2</sub>	RoW	2040	5,10	0,18	0,10	0,29	0,21	15,97	0,04	12,13	0,07
H <sub>2</sub>	DE	2050	5,02	0,16	0,08	0,29	0,17	13,09	0,03	12,13	0,06
H <sub>2</sub>	RoE	2050	4,53	0,15	0,07	0,26	0,16	11,81	0,03	10,94	0,06
H <sub>2</sub>	RoW	2050	6,09	0,20	0,09	0,35	0,21	15,88	0,04	14,72	0,08
Green Late	DE	2030	2,66	0,11	0,08	0,15	0,20	13,05	0,03	6,00	0,06
Green Late	RoE	2030	2,91	0,12	0,09	0,16	0,22	14,26	0,03	6,56	0,06
Green Late	RoW	2030	3,28	0,14	0,10	0,18	0,25	16,05	0,04	7,38	0,07
Green Late	DE	2040	3,13	0,12	0,07	0,17	0,17	12,03	0,03	7,28	0,05
Green Late	RoE	2040	3,69	0,14	0,09	0,21	0,20	14,19	0,03	8,59	0,06
Green Late	RoW	2040	4,15	0,16	0,10	0,23	0,23	15,97	0,04	9,67	0,07
Green Late	DE	2050	3,37	0,12	0,06	0,19	0,14	10,65	0,02	8,00	0,05
Green Late	RoE	2050	4,47	0,16	0,08	0,25	0,18	14,12	0,03	10,61	0,07
Green Late	RoW	2050	5,02	0,17	0,09	0,28	0,20	15,88	0,04	11,93	0,07
Green Supreme	DE	2030	2,76	0,10	0,07	0,15	0,14	10,80	0,02	6,40	0,05
Green Supreme	RoE	2030	2,92	0,11	0,07	0,16	0,14	11,41	0,03	6,77	0,05

Szenario	Re-gion	Jahr	Eisen und Stahl	Alu-minium	Kupfer	sonstige Metalle	Kunst-stoffe	Sande und Kiese	Asphalt	Beton	Sons-tige
Green Supreme	RoW	2030	3,28	0,12	0,08	0,18	0,16	12,84	0,03	7,61	0,06
Green Supreme	DE	2040	2,90	0,10	0,05	0,16	0,12	9,07	0,02	6,89	0,04
Green Supreme	RoE	2040	3,63	0,13	0,07	0,20	0,15	11,35	0,03	8,63	0,05
Green Supreme	RoW	2040	4,08	0,14	0,08	0,23	0,16	12,77	0,03	9,71	0,06
Green Supreme	DE	2050	3,22	0,11	0,05	0,18	0,11	8,41	0,02	7,79	0,04
Green Supreme	RoE	2050	4,33	0,14	0,07	0,25	0,15	11,30	0,03	10,47	0,05
Green Supreme	RoW	2050	4,87	0,16	0,07	0,28	0,17	12,71	0,03	11,77	0,06

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.2.2 Rohstoffe je Szenario

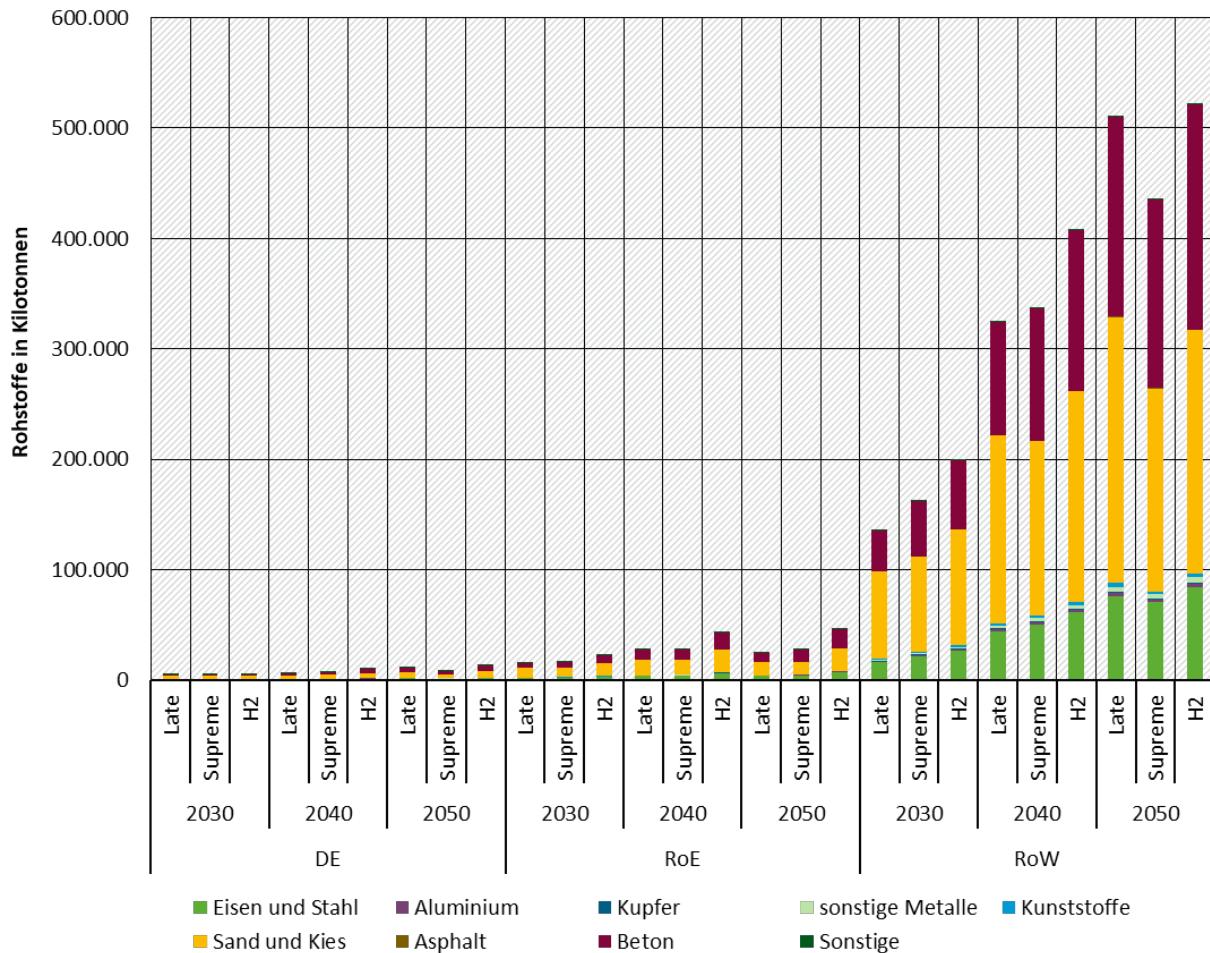
Abbildung 15 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für den Zubau von Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. Die gesamten Rohstoffbedarfe ergeben sich direkt durch Verrechnung der spezifischen Rohstoffbedarfe je kWh mit der im entsprechenden Jahr, Szenario und Region ermittelten Stromerzeugung (TWh/a) aller Onshore-Windenergieanlagen (siehe Tabelle 39 in Anhang A.1).

In Deutschland werden im Jahr 2030 in allen drei Szenarien ähnliche Rohstoffmengen für die Onshore-Windenergieanlagen beansprucht; im H<sub>2</sub>-Szenario ca. 5,3 Mio. t, im GreenSupreme-Szenario etwa 5,5 Mio. t und im GreenLate-Szenarien ca. 5,2 Mio. t. Dominiert wird der Rohstoffbedarf von den Sanden und Kiesen sowie Betonbedarfen. Im Jahr 2040 und 2050 intensiviert sich in Deutschland durch den Zubau der Rohstoffbedarf weiter. Im Jahr 2050 werden im GreenLate-Szenario und im H<sub>2</sub>-Szenario rund 13 Mio. t Rohstoffe gebraucht, im GreenSupreme-Szenario etwa 8 Mio. t.

In der EU ohne Deutschland zeichnet sich bereits im Jahr 2030 der Mehrbedarf an Strom und damit Rohstoffen im H<sub>2</sub>-Szenario ab. Es werden ca. 39-44 % mehr Rohstoffe für Onshore-WEA benötigt als in den anderen beiden Szenarien, um die Stromproduktion sicherzustellen. Bis 2050 verstärkt sich diese Differenz, im GreenLate-Szenario und im GreenSupreme-Szenario fallen nur etwa die Hälfte der Rohstoffbedarfe an wie im H<sub>2</sub>-Szenario, dessen Bedarf im Jahr 2050 bei etwa 47 Mio. t liegt.

In der Welt ohne EU werden im GreenLate-Szenario im Jahr 2030 nahezu 135 Mio. t Rohstoffe benötigt (geringste Menge im Szenariovergleich). Bis 2050 kommt es beinahe zu einer Vervierfachung des Bedarfs. Lediglich im H<sub>2</sub>-Szenario liegt der Bedarf mit rund 523 Mio. t noch höher.

**Abbildung 15: Rohstoffbedarf für zugebaute Onshore-WEA**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

### 6.3 Windenergieanlagen offshore

Derzeit setzen sich die weltweiten Kapazitäten an Windenergieanlagen zu 93 % aus Onshore- und zu lediglich 6 % aus Offshore-Anlagen zusammen (Hutchinson und Zhao 2023). Bis 2050 wird das Wachstum der Offshore-Windenergie deutlich höher eingeschätzt als bei Onshore-Windenergieanlagen, sodass es nach einem ambitionierten Szenario bis zu 1.000 GW installierte Offshore-Windenergieleistung bis 2050 geben könnte (European Commission et al. 2020).

Der verhältnismäßig geringe Anteil von Offshore-Windenergieanlagen ist darauf zurückzuführen, dass sich die Kosten von Onshore- und Offshore-Anlagen erheblich unterscheiden, obwohl sie grundsätzlich ähnliche Technologien verwenden. Die Kosten von Offshore-Windprojekten waren 2022 im Durchschnitt pro erzeugter Kilowattstunde Strom 145 % höher als die von Onshore-Windprojekten und mehr als 60 % höher als die von Solar-PV-Projekten im industriellen Maßstab (IRENA 2023).

#### 6.3.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 19 zeigt den Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus einer Offshore-Windenergieanlage (Offshore-WEA). Die Rohstoffbedarfe basieren auf dem Modul „electricity production from Wind, offshore“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Die Bedarfe variieren über die Jahre, Regionen und Szenarien entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Die hier angenommenen Leistungen der

Offshore-Windenergieanlagen unterscheidet sich nach Szenario und Jahr (siehe (Dittrich et al. 2024b)). Für 2030 liegt die angenommene Leistung einer Anlage bei 11,5 MW (GreenLate) bzw. 13 MW (GreenSupreme / H<sub>2</sub>-Szenario) und damit deutlich Über den durchschnittlichen Leistung von Offshore-Windenergieanlagen in 2021 in Europa (6,7 MW) oder China (8,5 MW) (IRENA 2023).

Für die Produktion einer kWh Strom aus Offshore-Windenergieanlagen fallen Rohstoffbedarfe an, die sich (je nach Szenario, Jahr und Region) zu 47-62 % aus Beton, zu 31-45 % aus Eisen und Stahl, zu 2-4 % aus Aluminium, zu 1-2 % aus Kupfer, zu 2 % aus weiteren Metallen sowie zu 1 % aus Kunststoffen zusammensetzen. Kleine Mengen weiterer, sonstiger Metalle umfassen u. a. Nickel, Zinn, Blei und Zink.

Im Vergleich zu Onshore-WEA fällt der Rohstoffbedarf von Aluminium, Kupfer, sonstigen Metallen und Kunststoffen pro kWh bei Offshore-WEA niedriger aus. In der Welt ohne EU sind die Bedarfe an Eisen und Stahl pro kWh Offshore-WEA im H<sub>2</sub>- und im GreenLate-Szenario höher als bei Onshore-WEA.

Die spezifischen Rohstoffbedarfe variieren zwischen den Regionen und Szenarien. Der gesamt spezifische Rohstoffbedarf pro kWh nimmt dabei insgesamt über den Zeitverlauf in allen Regionen zu. Dies ist vor allem auf den spezifischen Betonbedarf zurückzuführen, welcher je nach Region und Szenario zwischen 21 – 44 % zunimmt. Die gesamten spezifischen Rohstoffbedarfe sind in Deutschland und EU ohne DE um 31-39 % bzw. 23-30 % niedriger als in der Welt ohne EU.

In der Welt ohne EU werden pro kWh Strom aus Offshore-Windenergieanlagen im GreenSupreme-Szenario ca. 8,6-9,6 g Rohstoffe benötigt, davon weitestgehend Beton (5-6 g/kWh). In den anderen Szenarien liegt der gesamte spezifische Rohstoffbedarf der Welt ohne EU nochmal etwa 25 % höher, bei 10-12 g/kWh.

**Tabelle 19: Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus Offshore-WEA**

Szenario	Region	Jahr	Eisen und Stahl	Alu-minium	Kupfer	sonstige Metalle	Kunst-stoffe	Sande	Beton	Sonstige
H <sub>2</sub>	DE	2030	2,51	0,20	0,11	0,14	0,06	0,00	4,09	0,03
H <sub>2</sub>	RoE	2030	2,66	0,21	0,11	0,14	0,06	0,00	4,32	0,03
H <sub>2</sub>	RoW	2030	3,79	0,30	0,16	0,21	0,09	0,00	6,16	0,04
H <sub>2</sub>	DE	2040	2,46	0,19	0,10	0,15	0,06	0,00	4,50	0,03
H <sub>2</sub>	RoE	2040	2,66	0,21	0,11	0,16	0,06	0,00	4,86	0,03
H <sub>2</sub>	RoW	2040	3,73	0,30	0,16	0,22	0,09	0,00	6,83	0,04
H <sub>2</sub>	DE	2050	2,43	0,19	0,10	0,16	0,06	0,00	4,94	0,03
H <sub>2</sub>	RoE	2050	2,58	0,20	0,11	0,17	0,06	0,00	5,24	0,03
H <sub>2</sub>	RoW	2050	3,68	0,29	0,16	0,24	0,09	0,00	7,48	0,05

Szenario	Region	Jahr	Eisen und Stahl	Alu-minium	Kupfer	sonstige Metalle	Kunst-stoffe	Sande	Beton	Sonstige
Green Late	DE	2030	2,31	0,18	0,10	0,11	0,05	0,00	3,07	0,03
Green Late	RoE	2030	2,89	0,23	0,12	0,14	0,06	0,00	3,83	0,03
Green Late	RoW	2030	3,79	0,30	0,16	0,18	0,08	0,00	5,03	0,04
Green Late	DE	2040	2,43	0,19	0,10	0,13	0,06	0,00	3,83	0,03
Green Late	RoE	2040	2,85	0,23	0,12	0,15	0,07	0,00	4,50	0,03
Green Late	RoW	2040	3,73	0,30	0,16	0,20	0,09	0,00	5,88	0,04
Green Late	DE	2050	2,43	0,19	0,10	0,14	0,06	0,00	4,43	0,03
Green Late	RoE	2050	2,82	0,22	0,12	0,17	0,07	0,00	5,15	0,03
Green Late	RoW	2050	3,68	0,29	0,16	0,22	0,09	0,00	6,72	0,04
Green Supreme	DE	2030	1,85	0,15	0,08	0,10	0,04	0,00	3,02	0,02
Green Supreme	RoE	2030	2,31	0,18	0,10	0,13	0,05	0,00	3,76	0,03
Green Supreme	RoW	2030	3,03	0,24	0,13	0,17	0,07	0,00	4,93	0,04
Green Supreme	DE	2040	1,94	0,15	0,08	0,12	0,05	0,00	3,56	0,02
Green Supreme	RoE	2040	2,28	0,18	0,10	0,14	0,05	0,00	4,18	0,03
Green Supreme	RoW	2040	2,99	0,24	0,13	0,18	0,07	0,00	5,47	0,04
Green Supreme	DE	2050	2,03	0,16	0,09	0,13	0,05	0,00	4,13	0,03
Green Supreme	RoE	2050	2,26	0,18	0,10	0,15	0,06	0,00	4,59	0,03
Green Supreme	RoW	2050	2,94	0,23	0,12	0,19	0,07	0,00	5,99	0,04

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

### 6.3.2 Rohstoffe je Szenario

Abbildung 16 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für den Zubau von Offshore-Windenergieanlagen in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. Die gesamten Rohstoffbedarfe ergeben sich direkt durch Verrechnung der spezifischen Rohstoffbedarfe je kWh mit der im entsprechenden Jahr, Szenario und Region ermittelten Stromerzeugung (TWh/a) aller Offshore-Windenergieanlagen (siehe Tabelle 40 in Anhang 0).

In Deutschland fallen im H<sub>2</sub>-Szenario die höchsten Rohstoffbedarfe an. In der EU ohne DE gilt dies für 2040 und auch für 2050, für 2030 zeigt das GreenLate-Szenario den höchsten Rohstoffbedarf. In der Welt ohne EU liegt der gesamte Rohstoffbedarf im Jahr 2030 im H<sub>2</sub>-Szenario am höchsten, in 2040 nur knapp höher als in GreenLate und im Jahr 2050 überholt der Rohstoffbedarf in GreenLate jenen im H<sub>2</sub>-Szenario um 5 %.

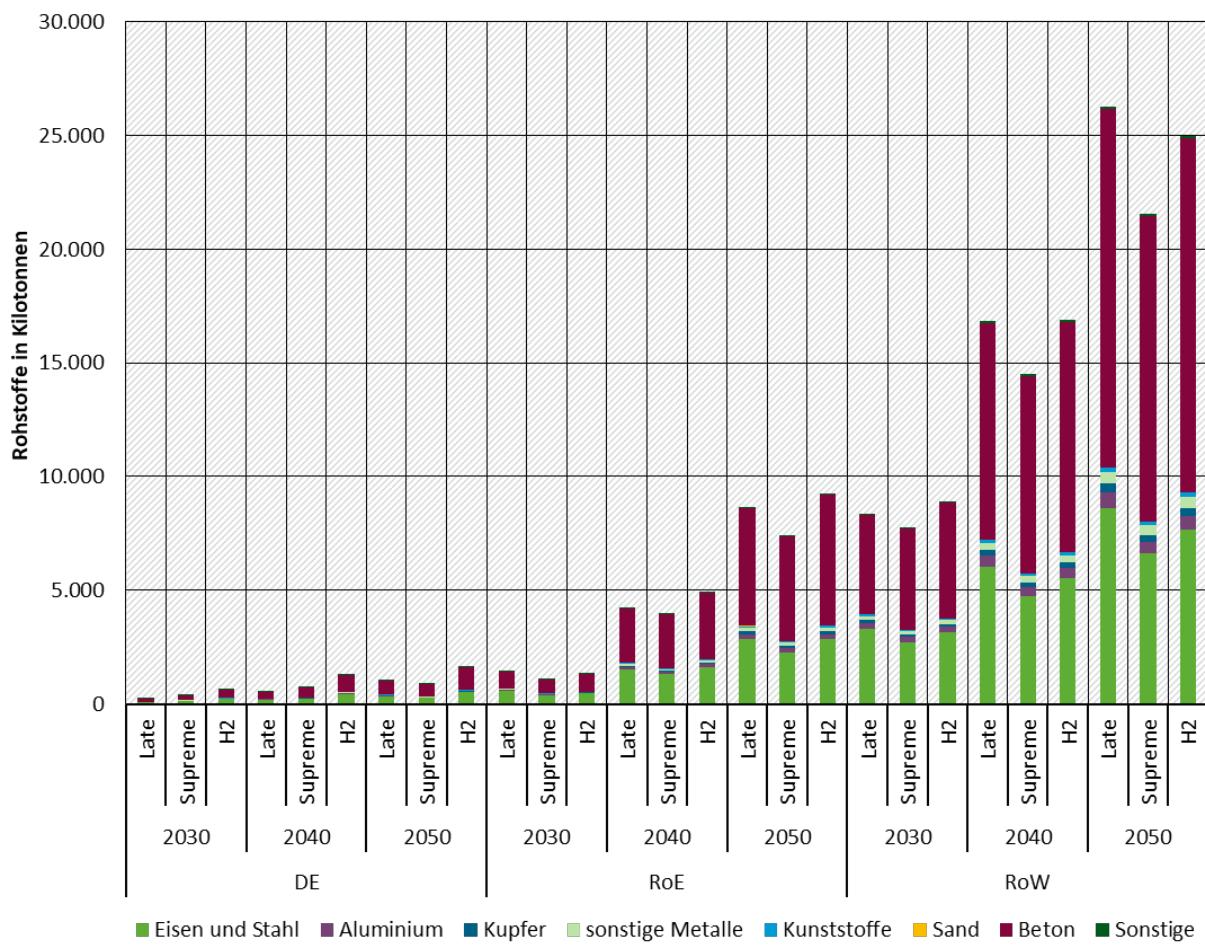
In Deutschland steigt der Bedarf im H<sub>2</sub>-Szenario im Jahr 2050 gegenüber 2030 um den Faktor 2,7 auf etwa 1.630 kt. In der EU ohne DE übersteigt der Zuwachs bis 2050 sogar einen Faktor 7 und liegt bei 9,2 Mio. t Rohstoffen. In Relation zum Rohstoffbedarf in der Welt ohne EU in Höhe von knapp unter 25 Mio. t zeigt sich, dass der Bedarf in der EU ohne DE enorm ist und bis zu 37 % des Bedarfs in der Welt ohne EU umfasst. Dies gilt ähnlich auch in den Green-Szenarien (34 % bzw. 33 % bei GreenSupreme bzw. GreenLate). Absolut werden in der Welt ohne EU im Jahr 2050 im GreenLate-Szenario 26,3 Mio. t für Offshore-Windenergieanlagen benötigt und im GreenSupreme-Szenario 21,6 Mio. t.

Der vergleichsweise hohe Rohstoffbedarf in der EU ohne DE begründet sich in der hohen Stromproduktion; im Jahr 2050 liegt die Stromerzeugung bei rund 1.000 TWh im GreenLate- und im GreenSupreme-Szenario und bei rund 1.100 TWh im H<sub>2</sub>-Szenario. Das ist etwa knapp die Hälfte (43 - 53 %) der Stromerzeugung, die in der Welt ohne EU von Offshore-Windenergieanlagen erzeugt wird.

Im Vergleich zu Onshore-Windenergieanlagen spielt der Rohstoffbedarf der Offshore-Anlagen eine kleinere Rolle. In der Welt ohne EU macht der Rohstoffbedarf für Offshore-Anlagen etwa 4-5 % des gesamten Rohstoffbedarfs für Windenergieanlagen aus. In der EU ohne DE steigt dieser Wert abhängig vom Szenario von ca. 5-8 % (2030) auf 17-26 % (2050). Auch in Deutschland macht der Rohstoffbedarf für Offshore-Anlagen ca. 10 % (H<sub>2</sub>-Szenario) bzw. <10 % (GreenLate und GreenSupreme) aus.

In der EU ohne DE liegt der Anteil des Stroms, der aus Offshore-Anlagen erzeugt wird mit 48 % im Schnitt über alle drei Szenarien (2050) deutlich höher als in Deutschland und der Welt ohne EU. In letzterer Region dominiert mit 87 % die Stromerzeugung aus Onshore-Windenergieanlagen im Jahr 2050.

**Abbildung 16: Rohstoffbedarf für zugebaute Offshore-WEA**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.4 Photovoltaik Dachanlage

Die Photovoltaik-Technologien (PV) erzeugen aus solarer Strahlungsenergie elektrischen Gleichstrom. Dazu werden weitestgehend mono- und polykristalline Solarzellen genutzt, welche mittels eines Halbleitermaterials und unter dem Einfluss von Sonnenlicht Elektronen in Bewegung setzt und damit Strom erzeugt. Dieser Gleichstrom wird über einen Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt.

In Deutschland sind aktuell ca. zwei Drittel der PV-Kapazitäten als Dachanlagen installiert. Diese bieten auch weiterhin ein gutes Potenzial für den weiteren Ausbau (Günnewig et al. 2022). Bisher werden lediglich 10 % des Dachpotenzials und weniger als 1 % des Fassadenpotenzials genutzt. Gebäudehüllen, d. h. Dächer und Fassaden, bieten in Deutschland ein technisches Potenzial in der Größenordnung von ca. 1.000 GW (Wirth 2023). Für eine schnellere Ausbaugeschwindigkeit bedarf es, neben dem Zubau von Dachanlagen, auch einem zusätzlich gesteigerten Zubau von Freiflächenanlagen (s. Kap. 6.5) (Günnewig et al. 2022).

Die Stromproduktion einer PV-Anlage hängt einerseits vom Standort und der verfügbaren Einstrahlung ab, andererseits vom Wirkungsgrad der Anlagen. PV-Dachanlagen erreichen am Standort Deutschland 922 Vollbelastungsstunden (VBh) (Wirth 2023).

Preise für PV-Kraftwerke fielen seit 2006 dank technologischen Fortschritts, Skalen- und Lerneffekten um über 75 % (Wirth 2023).

Für die Berechnungen der Szenarien wurde eine Anlagenlebensdauer von 30 Jahren im GreenSupreme-Szenario, von 25 Jahre im GreenLate-Szenario und 20 Jahren im H<sub>2</sub>-Szenario unterstellt (siehe (Dittrich et al. 2024b)).

PV-Dachanlagen sind keine neue Technologie und bereits im Jahr 2000 waren weltweit ca. 544 MW Leistung installiert. Mit der angesetzten Lebensdauer müssen im GreenSupreme-Szenario ab 2030 alle Anlagen, die 2000 in Betrieb genommen wurden, ersetzt werden. Analog dazu werden im Jahr 2050 Anlagen ersetzt, die ab 2020 zugebaut wurden. Für das H<sub>2</sub>-Szenario bedeutet dies, dass alle Anlagen die 2030 in Betrieb gehen, bereits 2050 wieder ersetzt werden müssen. Die Daten zum Bestand der weltweit installierten PV-Leistungen in allen Regionen für 2000 und 2010 stammen von (BMWK 2023; Quaschning 2023). Sowohl der Zubau als auch das Ersetzen der Anlagen werden für alle Regionen inkrementell auf die 10 Jahre zwischen den Stützjahren verteilt.<sup>23</sup> Sowohl der Zubau als auch das Ersetzen der Anlagen werden für alle Regionen inkrementell auf die 10 Jahre zwischen den Stützjahren verteilt.

#### 6.4.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 20 zeigt den Rohstoffbedarf in kg pro PV-Dachanlage einer Schrägdachanlage mit 20,8 m<sup>2</sup> Größe. Die Rohstoffbedarfe basieren auf dem Modul „20,8m<sup>2</sup> slanted-roof installation, panel, mounted, on roof“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Die Bedarfe variieren über die Jahre und Szenarien, für die Regionen bleiben sie unverändert entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Die Bedarfe europäischer Anlagen wurden auf die weiteren Regionen übertragen.

Für die Produktion einer Einheit PV-Schrägdachanlage fallen Rohstoffbedarfe an, die sich zu 10 % aus Eisen und Stahl, zu 23 % aus Aluminium, zu 24-25 % aus Sand und Kies, zu 5 % aus Beton, zu je 4 % aus Kupfer, Siliziummetall, und Kunststoffen sowie zu 25 % aus der Kategorie Sonstige zusammensetzen. Letztere besteht zu überwiegendem Anteil aus Kalk (*lime, packed*) und Grafit. Außerdem werden kleine Mengen sonstiger Metalle wie Zinn, Silber, Blei, Zink, Gold und Tantal benötigt.

Die spezifischen Rohstoffbedarfe unterscheiden sich über die Jahre und zwischen den Szenarien nur wenig. Im GreenLate-Szenario bleiben die Rohstoffbedarfe weitgehend konstant, lediglich bei Sonstigen besteht eine Verminderung des Rohstoffbedarfs im Jahr 2050 gegenüber den vorherigen Jahren. Insgesamt weist das GreenLate-Szenario den höchsten spezifischen Rohstoffbedarf auf.

Der spezifische Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario liegt leicht unterhalb der Bedarfe im GreenLate-Szenario. Über alle Rohstoffkategorien sinken die Bedarfe bis 2050 kontinuierlich, mit Ausnahme von Siliziummetall. Der Eisen- und Stahlbedarf etwa liegt im Jahr 2050 mit 71,61 kg pro Anlage etwa 1,6 kg unterhalb des Bedarfs im Jahr 2030 und sinkt damit am deutlichsten.

Das GreenSupreme-Szenario startet im Jahr 2030 mit dem geringsten spezifischen Rohstoffbedarf für die verschiedenen Materialien. Für Eisen und Stahl etwa liegt der 2030er Bedarf bereits unterhalb des Niveaus im Jahr 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario. Der Bedarf sinkt über die Stützjahre weiter; für Eisen und Stahl etwa um weitere 4,5 kg bis 2050. Auch für die weiteren Materialbedarfe wie Aluminium, Kupfer, sonstige Metalle und Kunststoffe sinken die Bedarfe. Lediglich für Siliziummetall ist auch im GreenSupreme-Szenario ein konstanter Bedarf hinterlegt.

---

<sup>23</sup> Der Anteil von 60 % der Dach-PV Anlagen an den gesamten installierten PV Kapazitäten in Deutschland wird auf die weiteren Regionen übertragen.

**Tabelle 20: Rohstoffbedarf in kg pro PV-Dachanlage (20,8 m<sup>2</sup>)**

Szenario	Jahr	Eisen und Stahl	Alumini-um	Kupfer	sonstige Metalle	Kunst-stoffe	Sonstige	Sand und Kies	Silizi-um-metall	Beton
H <sub>2</sub>	2030	73,19	166,49	31,10	0,92	28,19	178,56	174,10	28,66	34,34
H <sub>2</sub>	2040	72,40	166,25	30,69	0,85	28,15	178,41	174,09	28,66	34,34
H <sub>2</sub>	2050	71,61	166,01	30,27	0,78	28,11	178,25	174,08	28,66	34,34
<b>Green Late</b>	2030	73,98	166,73	31,52	0,99	28,23	178,72	174,11	28,66	34,34
<b>Green Late</b>	2040	73,98	166,73	31,52	0,99	28,23	178,72	174,11	28,66	34,34
<b>Green Late</b>	2050	73,98	166,73	31,52	0,99	28,23	178,72	174,11	28,66	34,34
<b>Green Supreme</b>	2030	71,29	165,91	29,96	0,89	28,09	178,18	174,08	28,66	34,34
<b>Green Supreme</b>	2040	68,90	165,18	28,59	0,79	27,96	177,71	174,05	28,66	34,34
<b>Green Supreme</b>	2050	66,79	164,54	27,38	0,70	27,85	177,29	174,02	28,66	34,34

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

#### 6.4.2 Rohstoffe je Szenario

Abbildung 17 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für den Zubau und Ersatz von PV-Dachanlagen in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. Die gesamten Rohstoffbedarfe werden auf Grundlage der spezifischen Rohstoffbedarfe (voriges Kapitel) und der Anzahl der zugebauten PV-Dachanlagen berechnet. Der Zubau an PV-Dachanlagen ergibt sich aus der zu erreichenden Stromerzeugung aus PV-Dachanlagen in den jeweiligen Jahren und der je Anlage erzeugbaren Strommenge pro Jahr (TWh/a) (siehe Tabelle 41 in Anhang A.3). Weiterhin werden die zu ersetzenen Anlagen nach Erreichen der vorgegebenen Lebensdauer (20-30 Jahre) berücksichtigt.

In Deutschland steigt die Stromerzeugung aus PV-Dachanlagen bis 2050 von 31 TWh auf rund 75 TWh in 2030, auf 85 TWh in 2040 und schließlich rund 93 TWh im Jahr 2050 im GreenSupreme-Szenario. Hierzu werden in den Dekaden 2020-2030 jährlich rund 1 Mio. Anlagen zugebaut, zwischen 2030-2040 jährlich (aufgrund der langen unterstellten Lebensdauer der Anlagen) lediglich rund 0,4 Mio. Anlagen und zwischen 2040-2050 noch etwa 0,9 Mio. Anlagen pro Jahr.

Im H<sub>2</sub>-Szenario wird für Deutschland von einer Stromerzeugung von 138 TWh im Jahr 2050 von PV-Dachanlagen ausgegangen. Auch aufgrund einer leicht niedrigeren Jahresleistung pro Anlage ergeben sich daher höhere Zubauraten als im GreenSupreme-Szenario; in der Dekade 2040-2050 sind diese mit jährlich ca. 2,23 Mio. Anlagen am höchsten. Im Jahrzehnt (2030-2040) davor liegt die zu erreichende Stromerzeugung mit 46 TWh weniger ambitioniert, sodass in dieser Dekade etwa 1 Mio. Anlagen pro Jahr zugebaut werden.

Im GreenLate-Szenario nimmt die Stromerzeugung für Deutschland durch PV-Dachanlagen erst sehr verzögert Fahrt auf; im Jahr 2030 sind lediglich 39 TWh<sup>24</sup> zu erzeugen, in 2040 59 TWh und im Jahr 2050 dann schließlich 104 TWh. Zwischen 2020 und 2030 werden jährlich lediglich ca. 0,4 Mio. Anlagen zugebaut bzw. alte Anlagen ersetzt (bezogen auf die Referenzanlage des Ökobilanzmodells); in der Dekade 2030-2040 sind es ca. 1,0 Mio. Anlagen jährlich und zwischen 2040-2050 wird nachgeholt, indem jährlich ca. 1,9 Mio. Anlagen installiert werden.

In der EU ohne DE sowie in der Welt ohne EU, werden im GreenSupreme-Szenario und im H<sub>2</sub>-Szenario jährlich zwischen 2020-2030 noch ähnlich viele Anlagen zugebaut, ca. 7 Mio. Stück (in der EU ohne DE) und 69 Mio. Anlagen in der Welt ohne EU. Bis 2050 manifestieren sich dann deutliche Unterschiede trotz ähnlicher Stromerzeugung vor allem durch die um 10 Jahre kürzeren Lebensdauern der PV-Dachanlagen im H<sub>2</sub>-Szenario.

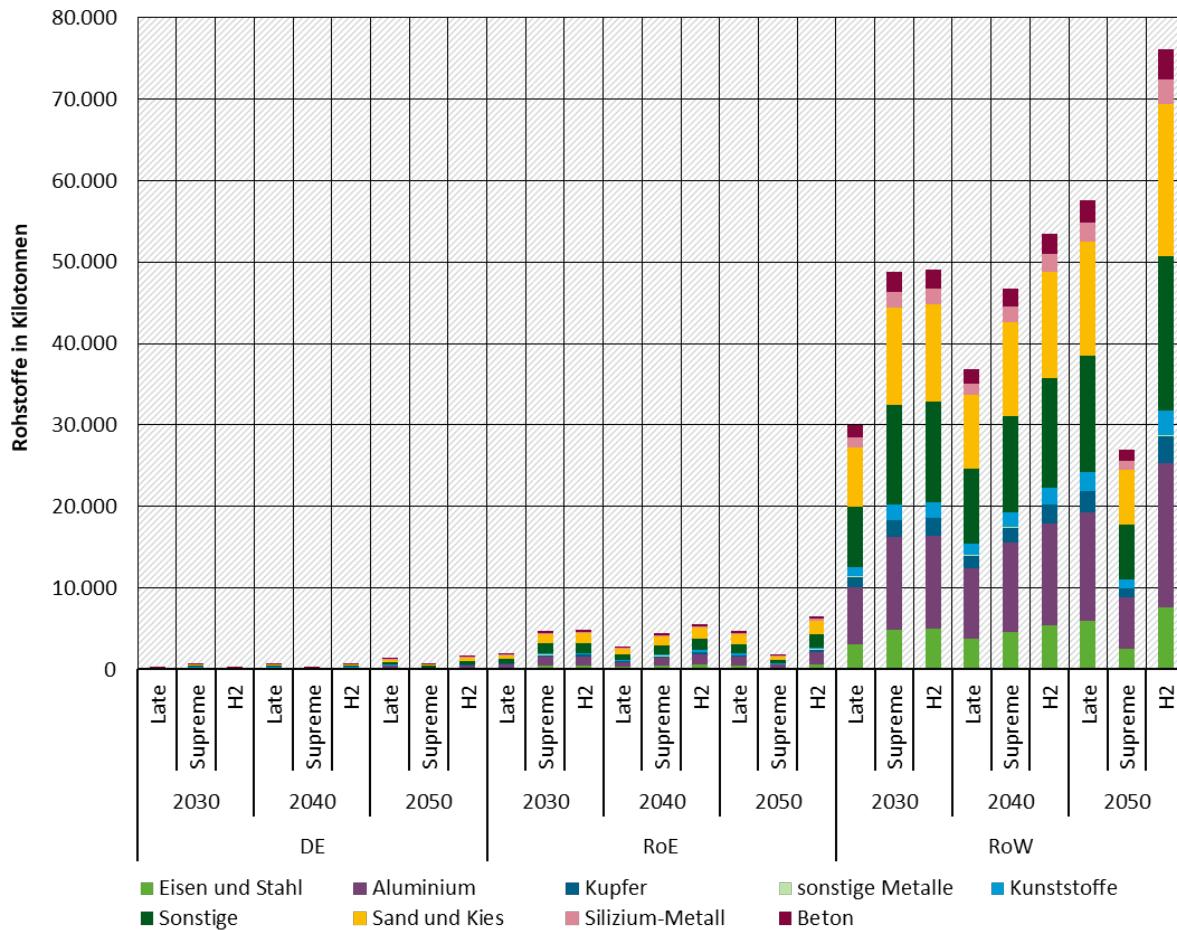
Im GreenLate-Szenario ist in beiden Regionen (EU ohne DE und Welt ohne EU) die Stromerzeugung aus PV-Dachanlagen weniger ambitioniert als in GreenSupreme und dem H<sub>2</sub>-Szenario. Der jährliche Anlagenzubau liegt zwischen 2020-2030 und 2030-2040 jeweils niedriger. Bis 2050 übersteigt der Rohstoffbedarf jedoch den von GreenSupreme, bedingt durch die 5 Jahre kürzere Lebensdauer der Anlagen im GreenLate Szenario. Im Jahr 2050 müssen in GreenLate in der EU ohne DE 6,5 Mio. und in der Welt ohne EU rd. 80 Mio. PV-Dachanlagen zugebaut werden.

Übersetzt in absolute Rohstoffbedarfe bedeutet dies einen erheblichen Anstieg bisheriger Bedarfe. In Abbildung 17 ist der durch den Zubau resultierende Rohstoffbedarf in Kilotonnen abgebildet.

---

<sup>24</sup> Die für die Stützjahre festgelegte Stromerzeugung geht auf Szenarioannahmen aus RESCUE zurück (Dittrich et al. 2020d). Verglichen mit der Ende 2023 in Deutschland installierte Gesamtleistung von ca 81,7 GW (Bundesnetzagentur o.J.) bei 922 Vollaststunden (Wirth 2023) und einem Anteil von ca. 60 % Dach-PV wurden mit ca. 45 TWh die in GreenLate für 2030 zu erzielenden Stromerzeugung 2023 bereits übertroffen. Gleiches gilt für den daraus abgeleitet jährlichen Zubau an PV-Dachanlagen. (Enkhhardt 2024)

**Abbildung 17: Rohstoffbedarf für zugebaute PV-Dachanlagen**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In Deutschland ist der Rohstoffbedarf für den Zubau der PV-Dachanlagen im ambitionierten Pfad im GreenSupreme-Szenario in 2030 (680 kt) im Vergleich zu den anderen Szenarien am höchsten. Im Jahr 2050 bedarf der Zubau in GreenSupreme nur noch rd. 620 kt Rohstoffe, während im H<sub>2</sub>-Szenario und im GreenLate-Szenario je etwa 1,6 Mio. t bzw. 1,3 Mio. t Rohstoffe für den Zubau benötigt werden.

In der EU ohne DE werden im H<sub>2</sub>-Szenario im Jahr 2030 und 2040 etwa 4,9 Mio. t bzw. 5,6 Mio. t Rohstoffe für den Zubau benötigt; im Jahr 2050 verstärkt sich der Rohstoffbedarf auf ca. 6,6 Mio. t. Ähnlich verhält es sich in der Welt ohne EU: im Jahr 2050 steigt der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario von etwa 49 Mio. t im Jahr 2030 und 54 Mio. t im Jahr 2040 auf über 76 Mio. t an.

Auch im GreenLate-Szenario intensiviert sich der Bedarf im Jahr 2050 in der EU ohne DE auf 4,7 Mio. t Rohstoffe und in der Welt ohne EU auf 57,6 Mio. t Rohstoffe, um die vorgegebenen Zubauraten an PV-Dachanlagen sicherzustellen. Damit liegt der Bedarf im GreenLate-Szenario 2050 in der EU ohne DE um den Faktor 2,6 über dem des GreenSupreme-Szenarios. In der Welt ohne EU ist der Bedarf im GreenLate-Szenario um den Faktor 2,1 höher als im GreenSupreme-Szenario. Im H<sub>2</sub>-Szenario liegt der Rohstoffbedarf in den Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU im Jahr 2050 um den Faktor 3-4 über dem Bedarf im GreenSupreme-Szenario.

## 6.5 Photovoltaik Freiflächenanlage

Die Stromproduktion einer PV-Anlage hängt einerseits vom Standort und der verfügbaren Einstrahlung ab, andererseits vom Wirkungsgrad der Anlage. Für PV-Freiflächenanlagen wird 2021 am Standort Deutschland von ca. 987 Vollbenutzungsstunden (VBh) ausgegangen. PV-Freiflächen haben eine leicht höhere Vollastkennzahl als Dachanlagen mit ca. 922 VBh. (Wirth 2023)

Der nominelle Wirkungsgrad von kristallinen Modulen lag 2015 bei durchschnittlich 17,5 % (Wirth 2020). Für neue Anlagen werden mittlerweile Werte von 20-21 % erreicht. Pro Quadratmeter Modul erbringen sie damit eine Nennleistung von ca. 200 W, Spitzenmodule liegen 10 % relativ höher. (Wirth 2023)

Im Bereich der neuen Formate zeichnet sich ein starker Trend zu größeren Wafern und auch größeren Modulen ab. Diese deutlich größeren Waferformate führen wiederum zu größeren Modulen, dies auch bei Aufdach- und Kraftwerksanwendungen. (VDMA 2022)

Im H<sub>2</sub>-Szenario werden über die Jahre zunehmend steigende Anteile der Wasserstoffherstellung aus der Stromerzeugung von PV-Freiflächenanlagen gedeckt. Im Jahr 2030 stammen 5,2 %, im Jahr 2040 ca. 10 % und im Jahr 2050 ca. 12 % des Strommixes für die Wasserstoffherstellung aus PV-Freianlagen.

### 6.5.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 21 zeigt den Rohstoffbedarf in g pro kWh Strom aus einer PV-Freiflächenanlage. Die Rohstoffbedarfe basieren auf dem Modul „electricity production from PV, open ground“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Der Aufschlüsselung der jeweils genutzten Module des Ökobilanzmodells folgend, wird der Rohstoffbedarf für PV-Freiflächen im Gegensatz zu PV-Dachanlagen (s. Kap 6.4.1) hier nicht nach Anlage, sondern pro kWh erzeugtem Strom angegeben. Die Bedarfe variieren über die Jahre, Regionen und Szenarien entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1).

Für die Produktion einer kWh Strom aus PV-Freiflächenanlagen fallen Rohstoffbedarfe an, die sich zu 21-23 % aus Eisen und Stahl, zu 24-25 % aus Aluminium, zu 19 % aus Sand, zu 7 % aus Beton, zu 2 % aus Kunststoffen, zu je 1 % aus Kupfer und sonstigen Metallen zusammensetzen. Die Anteile der Kategorie Sonstige liegen zwischen 22-25 %. Sie besteht zu überwiegendem Anteil aus Kalk (*lime, packed*) und Graphit. Kleine Mengen weiterer, sonstiger Metalle umfassen Zinn, Silber, Blei, Zink, Gold und Tantal.

Die spezifischen Rohstoffbedarfe sind im GreenLate-Szenario im Jahr 2030 in allen Regionen am höchsten. In allen Regionen gehen die Bedarfe bis 2050 zurück, liegen aber dennoch im Jahr 2050 noch über den Bedarfen die im GreenSupreme-Szenario hinterlegt sind. Für die Region Welt ohne EU gilt dies auch weiterhin gegenüber dem H<sub>2</sub>-Szenario. In den Regionen Deutschland und EU ohne DE liegen die spezifischen Rohstoffbedarfe für GreenLate im Jahr 2050 dann jedoch niedriger als im H<sub>2</sub>-Szenario.

Im GreenSupreme-Szenario liegen die Bedarfe insgesamt vergleichsweise auf einem geringen Niveau, bleiben über die Jahre auch nahezu konstant und sinken bis 2050 nur leicht ab.

Im H<sub>2</sub>-Szenario steigen die Rohstoffbedarfe in Deutschland und EU ohne DE bis 2050 leicht an, in der Welt ohne EU ist eine leicht sinkende Tendenz zu beobachten.

**Tabelle 21: Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 kWh Strom aus PV-Freifläche**

Sze-nario	Re-gion	Jahr	Eisen und Stahl	Alu-minium	Kupf-er	Sonst. Metalle	Kunst-stoffe	Sons-tige	Sand	Silizi-um-metall	Beton
H <sub>2</sub>	DE	2030	1,83	2,01	0,11	0,06	0,13	1,99	1,58	0,003	0,584
H <sub>2</sub>	RoE	2030	1,41	1,55	0,08	0,04	0,10	1,54	1,22	0,002	0,451
H <sub>2</sub>	RoW	2030	1,06	1,17	0,06	0,03	0,08	1,16	0,92	0,002	0,340
H <sub>2</sub>	DE	2040	1,84	2,03	0,11	0,06	0,13	2,01	1,59	0,003	0,590
H <sub>2</sub>	RoE	2040	1,43	1,58	0,08	0,04	0,10	1,56	1,24	0,002	0,459
H <sub>2</sub>	RoW	2040	1,05	1,16	0,06	0,03	0,08	1,16	0,91	0,002	0,338
H <sub>2</sub>	DE	2050	1,85	2,04	0,11	0,06	0,13	2,02	1,60	0,003	0,595
H <sub>2</sub>	RoE	2050	1,49	1,65	0,08	0,05	0,11	1,62	1,29	0,003	0,480
H <sub>2</sub>	RoW	2050	1,04	1,15	0,06	0,03	0,08	1,15	0,91	0,002	0,336
Green Late	DE	2030	2,00	2,19	0,12	0,06	0,14	1,96	1,71	0,003	0,636
Green Late	RoE	2030	1,54	1,69	0,09	0,05	0,11	1,51	1,32	0,003	0,491
Green Late	RoW	2030	1,26	1,38	0,07	0,04	0,09	1,24	1,08	0,002	0,402
Green Late	DE	2040	1,90	2,08	0,11	0,06	0,14	1,86	1,63	0,003	0,604
Green Late	RoE	2040	1,46	1,60	0,08	0,05	0,11	1,43	1,25	0,002	0,465
Green Late	RoW	2040	1,19	1,30	0,07	0,04	0,09	1,16	1,02	0,002	0,378
Green Late	DE	2050	1,81	1,98	0,11	0,06	0,13	1,77	1,55	0,003	0,575
Green Late	RoE	2050	1,39	1,52	0,08	0,04	0,10	1,36	1,19	0,002	0,441
Green Late	RoW	2050	1,12	1,23	0,07	0,03	0,08	1,10	0,96	0,002	0,357
Green Supreme	DE	2030	1,41	1,56	0,08	0,04	0,10	1,59	1,23	0,002	0,455
Green Supreme	RoE	2030	1,09	1,20	0,06	0,03	0,08	1,23	0,95	0,002	0,351

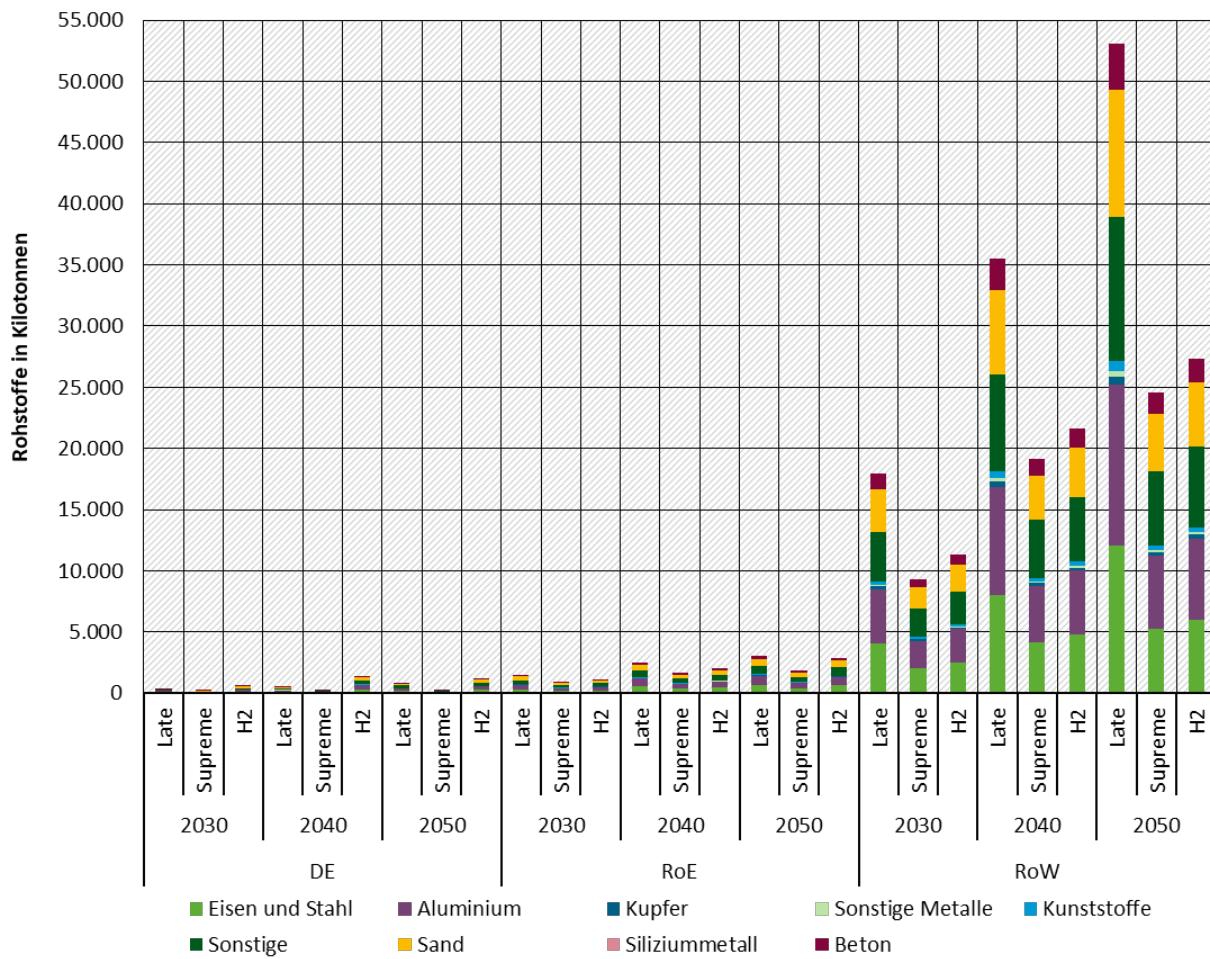
Szenario	Region	Jahr	Eisen und Stahl	Aluminuum	Kupfer	Sonst. Metalle	Kunststoffe	Sons-tige	Sand	Silizium-metall	Beton
Green Supreme	RoW	2030	0,84	0,93	0,05	0,03	0,06	0,95	0,73	0,001	0,272
Green Supreme	DE	2040	1,39	1,56	0,08	0,04	0,10	1,59	1,23	0,002	0,455
Green Supreme	RoE	2040	1,07	1,20	0,06	0,03	0,08	1,22	0,94	0,002	0,350
Green Supreme	RoW	2040	0,83	0,93	0,04	0,03	0,06	0,95	0,73	0,001	0,271
Green Supreme	DE	2050	1,38	1,56	0,07	0,04	0,10	1,59	1,23	0,002	0,455
Green Supreme	RoE	2050	1,06	1,19	0,06	0,03	0,08	1,22	0,94	0,002	0,349
Green Supreme	RoW	2050	0,82	0,92	0,04	0,03	0,06	0,94	0,72	0,001	0,269

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.5.2 Rohstoffe je Szenario

Abbildung 18 zeigt die absoluten Rohstoffbedarfe, die für den Zubau und Ersatz von PV-Freiflächen in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. Die absoluten Rohstoffbedarfe ergeben sich – im Gegensatz zu PV-Dach (siehe Kap. 6.4) – nicht über die Materialbedarfe pro Anlage, sondern direkt durch Verrechnung der spezifischen Rohstoffbedarfe je kWh erzeugtem Strom mit der im entsprechenden Jahr, Szenario und Region vorgegebenen absoluten Stromerzeugung (TWh/a) (siehe Tabelle 42 in Anhang A.4).

**Abbildung 18: Rohstoffbedarf für zugebaute PV-Freiflächenanlagen**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In Deutschland beansprucht das H<sub>2</sub>-Szenario den größten Rohstoffbedarf für den Zubau der PV-Freiflächenanlagen in allen Stützjahren für sich, bedingt durch den höchsten Strombedarf. Im Jahr 2030 werden 566 kt, im Jahr 2040 ca. 1.423 kt und im Jahr 2050 werden 1.167 kt Rohstoffe für PV-Freiflächenanlagen benötigt. Im GreenSupreme-Szenario wird im direkten Vergleich zu den anderen Szenarien weniger Strom aus PV-Freiflächenanlagen bezogen, was sich in einem geringeren Rohstoffbedarf widerspiegelt; im Jahr 2050 etwa werden 80 % weniger Rohstoffe benötigt als im H<sub>2</sub>-Szenario. Im GreenLate-Szenario ist der Bedarf etwa 28 % niedriger als im H<sub>2</sub>-Szenario.

In der EU ohne DE zeichnet sich für das GreenLate-Szenario aufgrund des höchsten Strombedarfs auch der höchste Rohstoffbedarf ab. Im Jahr 2050 liegt dieser jedoch nur noch wenig höher als beim H<sub>2</sub>-Szenario, was auf den verminderten spezifischen Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario zurückzuführen ist, während der spezifische Bedarf im H<sub>2</sub>-Szenario leicht steigt.

In der Welt ohne EU ist der Rohstoffbedarf durchgehend im GreenLate-Szenario am höchsten und steigt kontinuierlich über die Jahre. Im Jahr 2050 werden für eine Stromerzeugung von etwa 10.700 TWh rund 53 Mio. t Rohstoffe benötigt. Die Bedarfe liegen im gleichen Jahr im GreenSupreme-Szenario 54 % und im H<sub>2</sub>-Szenario 49 % niedriger.

## 6.6 Wärmepumpen

Wärmepumpen entziehen einer Niedrigtemperaturquelle (Sole, Wasser oder Luft) Wärme und machen diese zu Heizzwecken nutzbar. Der Antrieb kann elektrisch oder durch Wärmeenergie erfolgen. Die gebräuchlichste und effizienteste Bauform ist die Kompressionswärmepumpe. In dieser läuft die Wärmeübertragung ab, in dem ein Kältemittel in einem Kreislauf aus Verdampfung und Kondensation zirkuliert. Das flüssige Kältemittel wird unter niedrigem Druck durch die Wärmeenergie der Niedertemperaturquelle verdampft. Der Verdichter pumpt das dampfförmige Kältemittel dann zum Kondensator. Durch die gleichzeitige Druckerhöhung steigt die Temperatur des Kältemittels. Im Kondensator gibt das Kältemittel die zuvor im Prozess aufgenommene Wärme wieder ab und kondensiert. Im Expansionsventil entspannt sich das Kältemittel bei gleichzeitiger adiabater Temperaturreduktion bevor das Kältemittel wiederum den Verdampfer erreicht (Quaschning 2019).

Es wird davon ausgegangen, dass die Investitionskosten für verschiedene Wärmepumpensysteme um bis zu 35 % fallen, bezogen auf den Zeitraum 2015 bis 2050. Gleichzeitig sinkt die durchschnittliche Anlagenleistung für viele Wärmepumpensysteme, bspw. um 25 % für Luft-Wasser-Wärmepumpen (Schick et al. 2018). Weiter ist mit einer Effizienzsteigerung aufgrund von technischen Verbesserungen zu rechnen, die sich in einer kontinuierlichen Steigerung der Jahresarbeitszahl niederschlägt. Diese gibt das Verhältnis von erzeugter Wärmeenergie zum eingesetzten Strom an. Ein effizienterer Einsatz von Wärmepumpen wird auch in Folge der zunehmenden Digitalisierung, durch die Integration in Smart-Home-Systeme und algorithmische Steuerung möglich (Born et al. 2017).

Für die Berechnungen der Szenarien wurde eine Anlagenlebensdauer von 20 Jahren unterstellt (Dittrich et al. 2020b). Es wird angenommen, dass der aktuelle Bestand an Wärmepumpen, in allen Regionen überwiegend aus neueren Anlagen besteht. Daher müssen ab 2040 alle Anlagen, die 2020 im Betrieb genommen wurden, ersetzt werden. Analog dazu werden im Jahr 2050 Anlagen ersetzt, die ab 2030 zugebaut wurden. Sowohl der Zubau als auch das Ersetzen der Anlagen werden für alle Regionen jeweils inkrementell auf die 10 Jahre zwischen den Stützjahren verteilt.

### 6.6.1 Rohstoffe in ST

Der Rohstoffbedarf für Wärmepumpen basiert auf dem Modul „heat pump production, brine water, 10kW“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). In Tabelle 22 ist der Rohstoffbedarf pro Anlage, nach Jahr und Szenario, entsprechend den Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1), dargestellt. Aufgrund verschiedener Annahmen zur Entwicklung der Materialeffizienz in den Szenarien, bleibt der Rohstoffbedarf pro Anlage bis 2050 im GreenLate-Szenario konstant, während er im H<sub>2</sub>-Szenario um 10 % und im GreenSupreme-Szenario um ca. 30 % gegenüber dem Jahr 2020 sinkt.

Der Rohstoffbedarf enthält alle Materialien, die im Wärmepumpensystem verbaut sind, ausschließlich weiterer Ressourcen, die für den Betrieb benötigt werden, wie Energie und Wasser. Abfallprodukte oder Rohstoffbedarfe aus der Vorkette werden hier ebenfalls nicht berücksichtigt.

Der Rohstoffbedarf von Wärmepumpenanlagen wird dominiert von Metallen. Hierbei wird vor allem Bewehrungsstahl benötigt, je nach Szenario im Mittel über die Stützjahre zwischen 59-75 kg sowie und des Weiteren Kupfer (zwischen 17-22 kg) und niedriglegierter Stahl (zwischen 16-20 kg). Kunststoffe werden im Ausmaß von ca. 9-11 kg pro Anlage benötigt. Hinzu kommen kleinere Mengen Kühilstoff (2-3 kg) und Schmieröl (1-2 kg), die in der Kategorie Sonstiges zusammengefasst werden.

**Tabelle 22: Rohstoffbedarf in kg für eine Wärmepumpenanlage (10 kW)**

Szenario	Jahr	Stahl	Kupfer	Kunststoffe	Sonstiges
H <sub>2</sub>	2030	91,83	21,27	10,63	4,63
H <sub>2</sub>	2040	88,67	20,53	10,27	4,47
H <sub>2</sub>	2050	85,50	19,80	9,90	4,31
Late	2030	95,00	22,00	11,00	4,79
Late	2040	95,00	22,00	11,00	4,79
Late	2050	95,00	22,00	11,00	4,79
Supreme	2030	84,20	19,50	9,75	4,25
Supreme	2040	74,62	17,28	8,64	3,76
Supreme	2050	66,14	15,32	7,66	3,33

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.6.2 Rohstoffe je Szenario

Abbildung 19 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für den Zubau und Ersatz von Wärmepumpen in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen (siehe Tabelle 43 in Anhang 0). Hierbei wurde die Effizienzsteigerung in Form einer steigenden Jahresarbeitszahl berücksichtigt, nicht jedoch die Verbesserung der Materialeffizienz oder weitere potenzielle Effizienzsteigerungen durch die Nutzung von Smart-Home-Systemen. Es handelt sich dabei um eine konservative Schätzung der Rohstoffbedarfe. Für die Berechnung der benötigten Anlagen, werden die in den Szenarien jeweils angenommenen Gesamtkapazitäten an eingesetzten Wärmepumpen ermittelt und auf die im Ökobilanzmodell hinterlegte Referenzanlage bezogen. Im Gesamtbedarf eingeschlossen sind dabei sowohl kleine Wärmepumpen privater Haushalte, sowie große Quartiers- und Industriewärmepumpen. Dabei wird implizit angenommen, dass der Rohstoffbedarf durch das Hintereinanderschalten einzelner kleinerer Wärmepumpen linear skallierbar ist. Eine wie oben beschriebene prognostizierte durchschnittlichen Abnahme einiger Wärmepumpensysteme spielt aufgrund dieser Annahme keine Rolle für den Rohstoffverbrauch, wurde bei der folgenden Angabe der Anzahl an Wärmepumpen jedoch nicht berücksichtigt.

In Deutschland steigt der Bestand bis 2050 von derzeit 1,2 Millionen Wärmepumpen (2020) auf rund 12 Millionen im H<sub>2</sub>-Szenario, über 11 Millionen im GreenLate-Szenario und rund 11 Millionen im GreenSupreme-Szenario (bezogen auf die im Ökobilanzmodell hinterlegte Referenzanlage). Der jährliche Zubau verläuft dabei unterschiedlich in den Szenarien: in GreenLate liegt der Zubau bis 2030 etwa bei 40-45 % des Zubaus im H<sub>2</sub>-Szenario bzw. bei GreenSupreme. Zwischen 2030-2040 ist der jährliche Zubau bei GreenLate und dem H<sub>2</sub>-Szenario etwa gleich hoch und um rd. Faktor 1,4 höher als im GreenSupreme-Szenario. In der Dekade 2040-2050 liegt dann der Zubau bei GreenSupreme am höchsten (rd. Faktor 1,1 bzw. 1,2 höher als im H<sub>2</sub>-Szenario bzw. bei GreenLate).

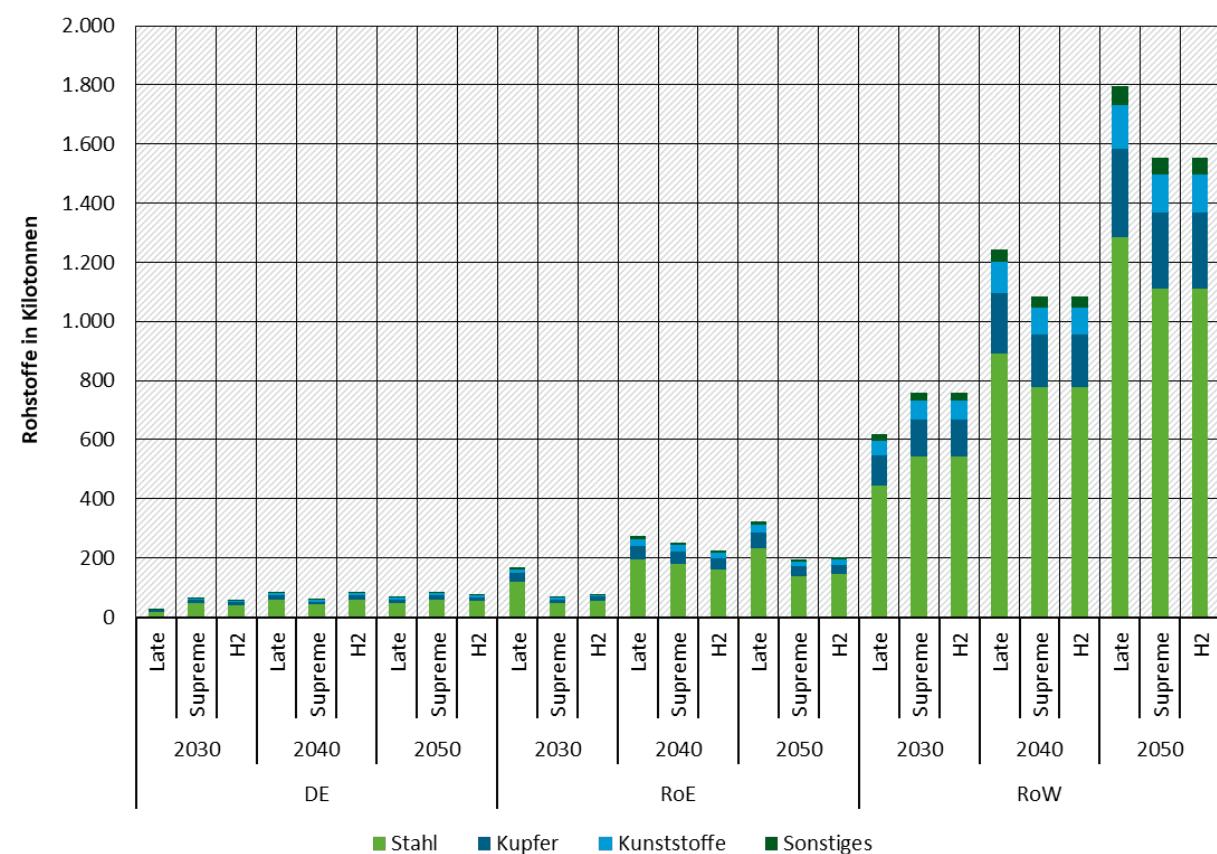
Dem entsprechend ist der Rohstoffbedarf in Deutschland im Jahr 2030 und 2050 bei GreenSupreme am höchsten und im GreenLate-Szenario im Jahr 2040. Im Jahr 2050 liegen die Rohstoffbedarfe bei 67 kt im GreenLate-Szenario, 77 kt im H<sub>2</sub>-Szenario und 83 kt im GreenSupreme-Szenario.

Der Anlagenbestand in der EU ohne DE verfünffacht sich bis 2050 im GreenSupreme-Szenario, im H<sub>2</sub>-Szenario liegt der Zubaufaktor bei 4,7, und im GreenLate-Szenario nimmt der Bestand bis 2050 um einen Faktor von 6,5 zu. Im GreenLate-Szenario ist daher allein im Jahr 2050 ein Zubau von rund 2,5 Mio. Wärmepumpenanlagen nötig, bzw. von 24,5 Mio. Anlagen zwischen 2040 und 2050.

Der Rohstoffbedarf für die Produktion bzw. den Zubau der Wärmepumpen der EU ohne DE beläuft sich daher im GreenLate-Szenario im Jahr 2050 auf 325 kt, damit werden in diesem Szenario rund 67 % mehr Rohstoffe benötigt als im GreenSupreme-Szenario und rund 61 % mehr als im H<sub>2</sub>-Szenario.

Der Bestand der Wärmepumpen in der Welt ohne EU nimmt, ausgehende vom heutigen Bestand von rd. 21 Mio. Anlagen, im GreenLate-Szenario um knapp das 11-fache bis 2050 zu, bei GreenSupreme und dem H<sub>2</sub>-Szenario liegt der Zubaufaktor bis 2050 etwa bei 9,4.

**Abbildung 19: Rohstoffbedarf für die Produktion von Wärmepumpenanlagen**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Im GreenLate-Szenario ist zwischen 2040 und 2050 ein Zubau von jährlich rund 13,5 Mio. Wärmepumpenanlagen nötig, im GreenSupreme- bzw. H<sub>2</sub>-Szenario sind für den gleichen Zeitraum jährlich rund 11,7 Millionen Zubauten nötig.

Der Rohstoffbedarf für die Produktion bzw. den Zubau der Wärmepumpen der Welt ohne EU liegt im GreenLate-Szenario im Jahr 2050 bei 1,8 Mio. t, damit werden in diesem Szenario rund 16 % mehr Rohstoffe benötigt als im GreenSupreme- bzw. H<sub>2</sub>-Szenario.

## 6.7 Elektrolyse

Bei der Elektrolyse spaltet elektrischer Gleichstrom Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff auf. An an den Elektroden laufen dabei zwei separate Reaktionen ab: Es entsteht Wasserstoff an der Kathode und Sauerstoff an der Anode. Ein Ladungsausgleich zwischen den beiden Reaktionen erfolgt über einen Elektrolyten und die entstehenden Gase Wasserstoff und Sauerstoff werden durch eine Membran voneinander getrennt. Mehrere Elektrolysezellen können in Reihe oder parallel geschaltet werden, um einen Stack zu bilden. (Liebich et al. 2020).

Wasser-Elektrolyseure lassen sich nach der Art der eingesetzten Elektrolyte in unterscheiden. Für die nachfolgenden Berechnungen der Rohstoffbedarfe wird die alkalische Elektrolyse (AEL) unterstellt, die mit wässriger Kali- oder Natronlauge als Elektrolyt arbeitet. Wird die Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben, kann Wasserstoff weitgehend treibhausgasneutral hergestellt werden (grüner Wasserstoff) (Liebich et al. 2020).

Grüner Wasserstoff wird in Deutschland in den Green-Szenarien vor allem stofflich, zur Substitution der konventionellen Wasserstoffwirtschaft genutzt, allen voran in der chemischen Industrie und der Stahlherstellung (Purr et al. 2019). Im H<sub>2</sub>-Szenario wird Wasserstoff neben der stofflichen Nutzung in der Industrie auch energetisch in den Sektoren Industrie, Gebäudewärme und Verkehr genutzt (Sensfuß et al. 2021). In den beiden Regionen, EU ohne DE und Welt ohne EU, wird Wasserstoff ebenfalls hauptsächlich in der Industrie und dem Verkehr eingesetzt (Teske et al. 2019). Zudem wird Wasserstoff in erheblichem Maß als Zwischenprodukt benötigt, um PtX-Produkte, wie Methanol (Kap. 6.9) und FT-Treibstoffe (Kap. 6.10) herzustellen.

Für den AEL-Elektrolyseur wird eine Lebensdauer von 90.000 Betriebsstunden angenommen, was bei Vollaststunden von 8.700 h/a ca. 10 Jahren entspricht. Daher muss der Bestand an Elektrolyseuren jede Dekade vollständig erneuert werden.

### 6.7.1 Rohstoffe in ST

Der Rohstoffbedarf für Elektrolyse-Wasserstoff basiert auf dem Modul „hydrogen, alkali electrolysis technology“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Tabelle 23 stellt den Rohstoffbedarf dar, der benötigt wird, um eine Tonne Elektrolyse-Wasserstoff herzustellen. Der Rohstoffbedarf enthält alle Materialien, die im Zellstapel (Stack) des AEL-Elektrolyseurs verbaut sind. Weitere Bestandteile des Elektrolyseurs sind nicht inbegriffen. Ressourcen, die für den Betrieb benötigt werden, wie Energie und Wasser, sowie Abfallprodukte werden hier ebenfalls nicht berücksichtigt. Entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1), wird der Rohstoffbedarf für Elektrolyse-Wasserstoff als konstant über alle Regionen angenommen und sinkt pro Tonne produziertem Wasserstoff aufgrund angenommener Verbesserungen der Materialeffizienz bis 2050 im H<sub>2</sub>- und GreenSupreme-Szenario. Im GreenLate-Szenario bleibt der Rohstoffbedarf konstant.

Der Rohstoffbedarf des Elektrolyse-Wasserstoffs besteht zum größten Teil aus den Metallen Eisen und Stahl (86-87 %), Nickel (9 %), Kupfer (1,3-1,5 %) und Aluminium (0,5-0,7 %). In geringem Maße werden für die Wasserstoffproduktion auch sonstige Metalle wie Blei, Zinn, Zink, Silber, Gold, Zirkonium, Titan und Tantal benötigt, sowie kleine Mengen an Dämm- und Kunststoffen sowie Sande.

**Tabelle 23: Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t Elektrolyse-Wasserstoff**

Szenario	Jahr	Alumin ium	Eisen und Stahl	Kupfer	Blei	Nickel	Sonstige Metalle	Dämm- stoff	Kunst- stoff	Sand
H <sub>2</sub>	2030	132,8	16.980	291,35	0,01	1.668	84,97	0,71	140,84	3,94
H <sub>2</sub>	2040	129,42	16.962	286,63	0,01	1.668	84,96	0,68	140,24	3,81
H <sub>2</sub>	2050	126,04	16.943	281,91	0,01	1.668	84,96	0,66	139,65	3,68
Late	2030	136,19	16.999	296,07	0,01	1.668	84,97	0,73	141,43	4,08
Late	2040	136,19	16.999	296,07	0,01	1.668	84,97	0,73	141,43	4,08
Late	2050	136,19	16.999	296,07	0,01	1.668	84,97	0,73	141,43	4,08
Supreme	2030	124,65	16.936	279,96	0,01	1.668	84,96	0,65	139,41	3,62
Supreme	2040	114,43	16.880	265,69	0,01	1.668	84,96	0,58	137,61	3,22
Supreme	2050	105,36	16.830	253,04	0,01	1.668	84,95	0,51	136,02	2,86

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

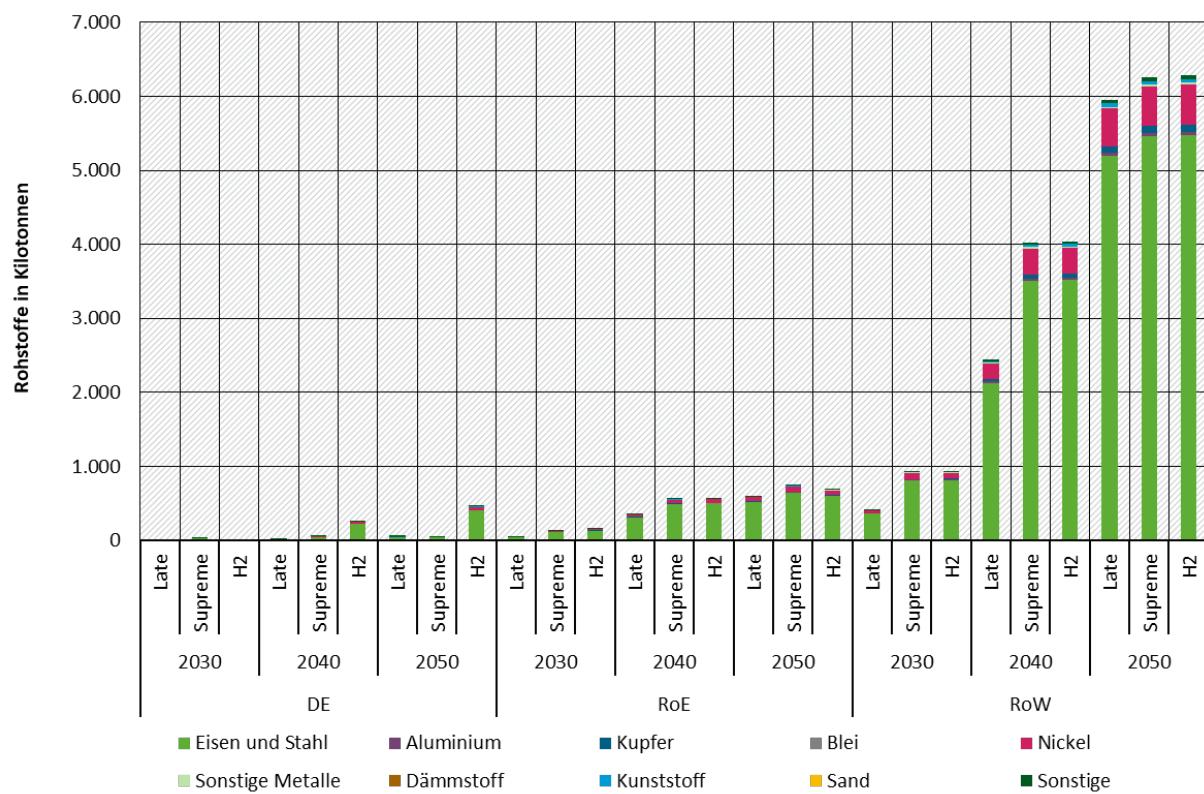
## 6.7.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für Elektrolyse-Wasserstoff ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Tonne hergestelltem Elektrolyse-Wasserstoffs mit den entsprechend benötigten Wasserstoffmengen im jeweiligen Szenario, Jahr und Region (siehe Tabelle 44 und Tabelle 44Tabelle 45 in Anhang A.6). Für die Wasserstoff-Elektrolyse werden unterschiedliche Auswertungsperspektiven präsentiert. Zunächst werden die Rohstoffbedarfe für Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt und als Zwischenprodukt für die Erzeugung von PtX-Produkten getrennt beschrieben. Zudem werden für Wasserstoff als Endprodukt die Rohstoffbedarfe nach den in den Regionen tatsächlichen anfallenden Verbräuchen dargestellt und zusätzlich die Rohstoffbedarfe differenziert nach den eigentlichen Produktionsorten. In Kapitel 6.17.2 wird zudem für Deutschland und die EU ohne DE der Rohstoffaufwand der PtX-Importe aggregiert ausgewertet.

### Rohstoffbedarf für Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt

Abbildung 20 zeigt den Rohstoffbedarf für Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt nach Nutzungsort in den jeweiligen Regionen. Der abgebildete Rohstoffbedarf schließt demnach den Eigenbedarf der Regionen als auch Rohstoffbedarfe ein, die aufgrund von Importen in anderen Regionen anfallen. Importe von Elektrolyse-Wasserstoff fallen ausschließlich im H<sub>2</sub>-Szenario in Deutschland an und stammen aus der EU ohne DE. Während 2030 noch keine Importe aus der EU ohne DE nach Deutschland gelangen, werden 2040 rund 81 % der Bedarfe in Deutschland durch Importe aus der EU ohne DE gedeckt, bis 2050 geht der Anteil am Gesamtbedarf auf 77 % zurück.

**Abbildung 20: Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt, nach Nutzungsziel**

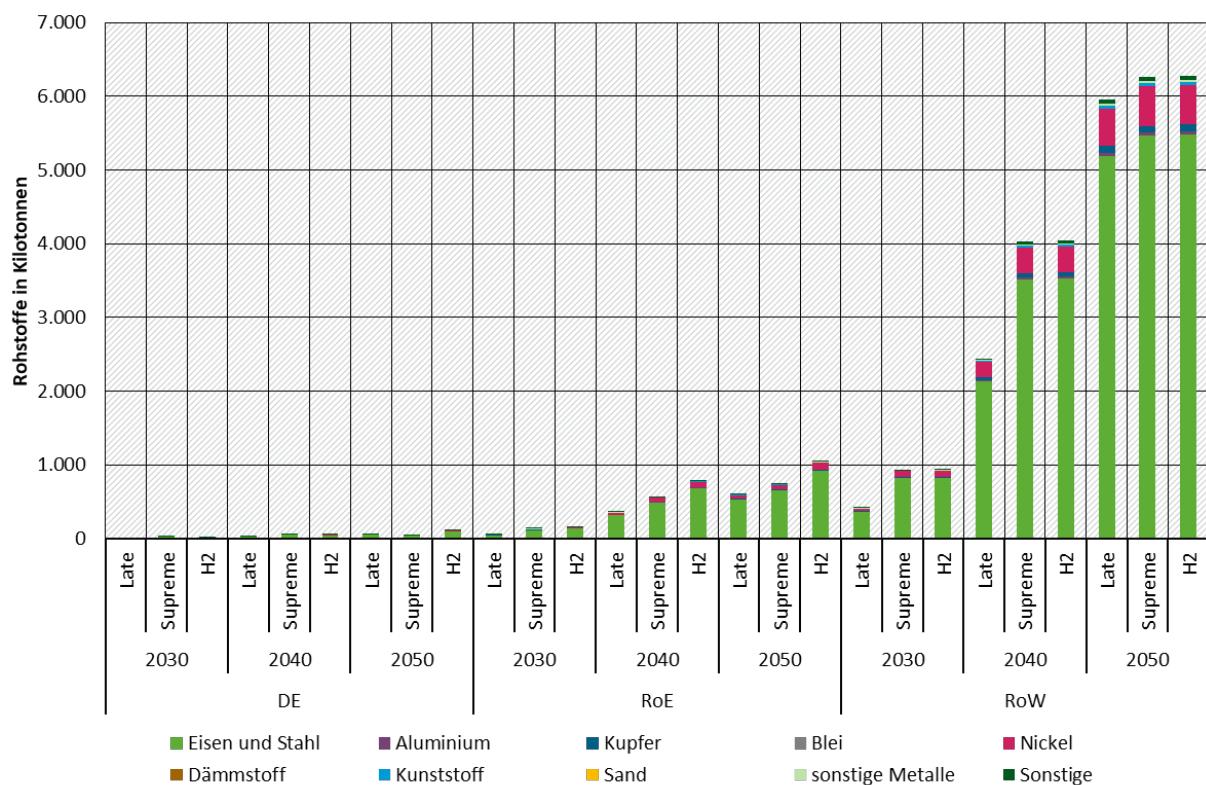


Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Abbildung 21 zeigt den Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff nach dem Produktionsort. Ausgenommen ist davon der Bedarf von Wasserstoff, der als Zwischenprodukt in PtX-Produktionsketten anfällt. Der abgebildete Rohstoffbedarf schließt sowohl den Eigenbedarf der Regionen als auch Rohstoffbedarfe ein, die aufgrund von Exporten in anderen Regionen anfallen.

In den Green-Szenarien wird der Wasserstoff-Bedarf aller Regionen durch Eigenerzeugung innerhalb der Region gedeckt. Die Ergebnisse stimmen deswegen mit denen in Abbildung 20 überein. Im H<sub>2</sub>-Szenario wird der Bedarf in Deutschland zusätzlich zur Eigenerzeugung mit Importen aus der EU ohne DE gedeckt. Die entsprechenden Rohstoffbedarfe für diese Importe sind in Abbildung 21 (im Unterschied zu Abbildung 20) unter dem Produktionsort Region EU ohne DE enthalten.

**Abbildung 21: Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In Deutschland startet der Ausbau der Elektrolysekapazitäten im GreenLate-Szenario erst nach 2030 und kommt schleppend in Gang. Während die lokal produzierte Menge an Wasserstoff im Jahr 2040 noch weniger als die Hälfte des H<sub>2</sub>- und des GreenSupreme-Szenarios ausmacht, beschleunigt sich der Ausbau nach 2040 deutlich. Mit knapp unter 3 Mio. t Wasserstoffproduktion überholt das GreenLate-Szenario im Jahr 2050 dann das GreenSupreme-Szenario mit einer Produktion von ca. 2,3 Mio. t Wasserstoff pro Jahr. Im GreenSupreme-Szenario startet der Ausbau der lokalen Produktionskapazitäten am schnellsten und liegt 2030 bei ca. 1,4 Mio. t. Der Höhepunkt der Wasserstoffproduktion wird 2040 mit ca. 2,8 Mio. t erreicht.

Im H<sub>2</sub>-Szenario liegt der Wasserstoffbedarf, der durch inländische Produktion gedeckt wird, im Jahr 2030 bei 204 kt, Importe sind noch keine gegeben. Im Jahr 2040 steigt die inländische Produktionskapazität auf 2,5 Mio. t Wasserstofferzeugung und es werden bereits knapp 11 Mio. t aus EU ohne DE importiert. Bis 2050 werden dann die inländischen Kapazitäten auf 5,4 Mio. t Wasserstofferzeugung stark ausgeweitet. Die Importmenge steigt auf rund 18,4 Mio. t Elektrolyse-Wasserstoff.

Entsprechend der erläuterten Entwicklungen liegt der Rohstoffbedarf im Jahr 2030 im GreenSupreme-Szenario am höchsten. Für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff liegt er bei knapp 27 kt (v. a. Stahl). Im Jahr 2040 steigt der Rohstoffbedarf auf rund 54 kt und sinkt bis 2050 auf knapp 45 kt ab. In GreenLate ist der Rohstoffbedarf im Jahr 2030 null, im Jahr 2040 liegt er bei rd. 22 kt und steigt bis 2050 um den Faktor 2,7 weiter an. Der höchste Rohstoffbedarf im Jahr 2050 fällt im H<sub>2</sub>-Szenario an. Dies sowohl nach Produktionsort (105 kt) als auch nach Nutzung in Deutschland (462 kt).

In der EU ohne DE weist das GreenLate-Szenario, anders als in DE, im Jahr 2030 bereits eine kleine Elektrolysekapazität in Höhe von 2,6 Mio. t Wasserstoff auf. Im Jahr 2040 beträgt die lokal produzierte Menge an Wasserstoff im GreenLate-Szenario lediglich rund 63 % des H<sub>2</sub>- bzw. 62 % des GreenSupreme-Szenarios. Nach 2040 beschleunigt sich der Ausbau und erreicht etwa 79 % der Wasserstoffproduktion im GreenSupreme- und 86 % der Kapazitäten im H<sub>2</sub>-Szenario. 2050 liegt die Produktionskapazität in der EU ohne DE im GreenSupreme-Szenario bei 38,6 Mio. t und im H<sub>2</sub>-Szenario bei rund 35,6 Mio. t.

In allen drei Stützjahren liegt der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario am höchsten. Im Jahr 2030 liegt er bei 153 kt sowohl für die lokale Produktion als auch den Nutzungsort (keine Exporte nach DE). Bis 2040 steigt der Rohstoffbedarf für die lokale Produktion auf 782 kt, wobei nach Nutzungsort 571 kt Rohstoffbedarfe anfallen. Bis 2050 erreicht der Rohstoffbedarf nach Produktionsort seinen Höchststand mit über 1 Mio. t, nach Nutzungsort liegt er bei 690 kt. Im GreenLate-Szenario beträgt der Rohstoffbedarf im Jahr 2050 knapp 600 kt und im GreenSupreme-Szenario rd. 740 kt.

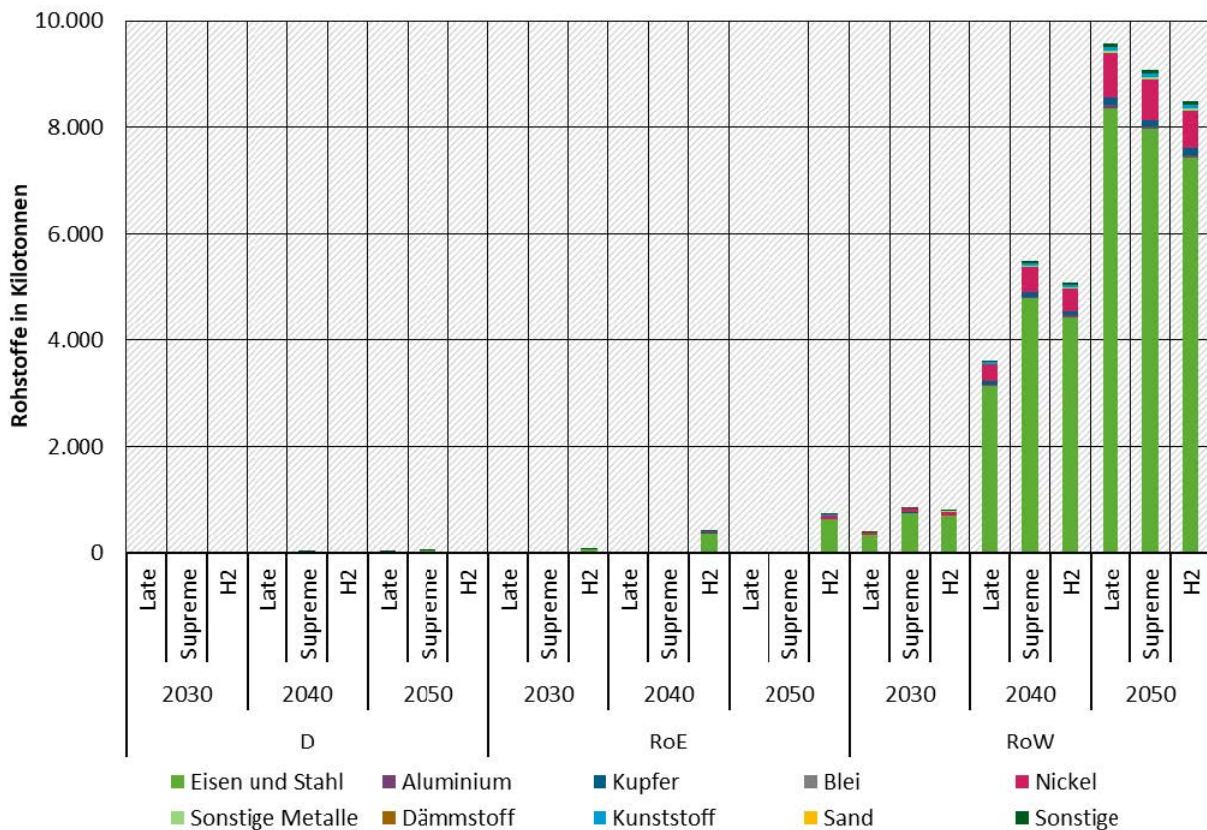
Für die Welt ohne EU bestehen ähnliche Entwicklungen. Das GreenLate-Szenario weist im Jahr 2030 eine Elektrolysekapazität in Höhe von rd. 21 Mio. t Wasserstoff auf, die bis 2050 auf das 14-fache ansteigt; das entspricht einer Produktionskapazität von 305 Mio. t. Auch in den anderen Szenarien wird ein beschleunigter Ausbau der Wasserstoffproduktion sichtbar, allerdings sind bereits 2030 die Kapazitäten etwa um den Faktor 2,6 (GreenSupreme) bis 3 (H<sub>2</sub>-Szenario) höher als im GreenLate-Szenario. Sowohl im H<sub>2</sub>- als auch im GreenSupreme-Szenario steigt die Wasserstoffproduktion bis 2050 auf 323 Mio. t.

In allen drei Stützjahren liegt der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario am höchsten, allerdings sind die Rohstoffbedarfe auf Grund des ähnlichen Ausbaus im GreenSupreme-Szenario beinahe auf gleicher Höhe. Im Jahr 2050 werden daher in beiden Szenarien rund 6,3 Mio. t Rohstoffe benötigt. Im GreenLate-Szenario liegt der Rohstoffbedarf mit rund 6 Mio. t nur knapp darunter.

#### **Rohstoffbedarf für Elektrolyse-Wasserstoff als Zwischenprodukt**

Abbildung 22 zeigt den Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff, der als Zwischenprodukt für die Produktion von weiteren PtX-Produkten genutzt wird. Der Rohstoffbedarf schließt sowohl den Eigenbedarf der Regionen als auch Rohstoffbedarfe ein, die aufgrund von Exporten in andere Regionen anfallen. Hierbei wurde grundsätzlich angenommen, dass die jeweilige Wasserstoffherstellung in dem Land anfällt, in dem das entsprechende PtX-Endprodukt hergestellt wird. Eine Ausnahme bildet Deutschland im H<sub>2</sub>-Szenario: Hier wird Elektrolyse-Wasserstoff für die Herstellung von PtL-Methanol aus der Region EU ohne DE importiert. Da es sich hierbei aus Sicht der exportierenden Region (EU ohne DE) um ein Endprodukt handelt, ist dieser Export im Rohstoffbedarf von Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt (Abbildung 20 und Abbildung 21) enthalten.

**Abbildung 22: Rohstoffbedarf für die Produktion von Elektrolyse-Wasserstoff als Zwischenprodukt für PtX, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Da der benötigte Wasserstoff für die PtX-Produktion im H<sub>2</sub>-Szenario importiert wird (siehe oben), fällt für die Eigenproduktion von PtX-Produkten in Deutschland im Jahr 2040 lediglich im GreenSupreme-Szenario Rohstoffbedarfe für Wasserstoff an. Im Jahr 2050 steigt der Bedarf an Wasserstoff für PtX-Produkte im GreenSupreme-Szenario stark an und nimmt mit 1,9 Mio. t einen Anteil von 45 % am gesamten Wasserstoffbedarf ein. Im Jahr 2050 fällt auch im GreenLate-Szenario ein zusätzlicher Wasserstoffbedarf für PtX, in Höhe von 1,2 Mio. t an. In Deutschland sind die anfallenden Rohstoffbedarfe für PtX-Wasserstoff auf die Produktion von PtG-Methan zurückzuführen. Damit einher geht ein Rohstoffbedarf im Jahr 2050 von rund 24 kt im GreenLate-Szenario und knapp über 36 kt im GreenSupreme-Szenario.

In der Region EU ohne DE fallen nur im H<sub>2</sub>-Szenario zusätzliche Wasserstoffbedarfe für PtX an., für die Eigenproduktion von PtL-Methanol. Insgesamt steigt der zusätzliche jährliche Wasserstoffbedarf für PtX von 3,2 Mio. t im Jahr 2030 auf 37,7 Mio. t im Jahr 2050, was einem Anteil am gesamten Wasserstoffbedarf der Region von 41 % entspricht. Der zusätzliche Rohstoffbedarf im Jahr 2050 liegt bei rund 730 kt.

In der Welt ohne EU fallen durch die Produktion von PtX-Produkten zusätzliche Wasserstoffbedarfe in beachtlichen Mengen an, sowohl für die Eigenproduktion als auch für Exporte in die anderen Regionen: in der EU ohne DE für Methanol und FT-Kraftstoffe, in Deutschland für Methan, Methanol und FT-Kraftstoffe. Der zusätzliche Wasserstoffbedarf der Region liegt im Jahr 2030 zwischen 21 Mio. t (GreenLate) und 44 Mio. t (GreenSupreme) und nimmt damit fast die Hälfte des gesamten Wasserstoffbedarfs in Anspruch. Im Jahr 2050 steigt der PtX-Wasserstoffbedarf auf rund 438 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario), 473 Mio. t (GreenSupreme) und

492 Mio. t (GreenLate), womit bis zu 62 % des jeweiligen gesamten Wasserstoffbedarfs auf die Bereitstellung von Wasserstoff für weitere PtX-Produkte entfällt. Der daraus resultierende Rohstoffbedarf der Welt ohne EU für die Bereitstellung von Wasserstoff für PtX-Zwischenprodukte im Jahr 2050 liegt im GreenLate-Szenario bei 9,6 Mio. t, im GreenSupreme-Szenario bei 9,1 Mio. t und im H<sub>2</sub>-Szenario bei 8,5 Mio. t.

## 6.8 Methanisierung

Die Methanisierung ist eine chemische Reaktion, bei der Kohlenmonoxid (CO) oder Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) mit Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in Methan (CH<sub>4</sub>) umgewandelt wird. Sie wird auch als Sabatier-Reaktion bezeichnet und ist seit dem frühen 20. Jahrhundert bekannt. Für die im Weiteren angenommene Produktion von Power-to-Gas (PtG)-Methan kommt Elektrolyse-Wasserstoff zum Einsatz, der ausschließlich mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wurde. Das für die Sabatier-Reaktion benötigte CO<sub>2</sub> kann aus verschiedenen Quellen stammen. Für die Produktion können Punktquellen, wie z. B. Zementwerke genutzt werden, bei denen das CO<sub>2</sub> abgeschieden wird. Ansonsten wird CO<sub>2</sub> aus der Luft, mit sog. Direct Air Capture (DAC), gewonnen.

Methan ist ein wichtiger Rohstoff für die chemische Industrie. Das synthetisch erzeugte Erdgas (SNG) ist eine vollwertige Alternative zu konventionellem Erdgas. In den Szenarien GreenLate und GreenSupreme kommt PtG-Methan vor allem in der Industrie zum Einsatz. Hier wird es sowohl als Rohstoff, als auch als Brennstoff für Hochtemperaturprozesse benötigt. In GreenLate wird Methan zusätzlich für den Betrieb eines Restbestandes an Gasheizungen verwendet (Dittrich et al. 2020d; c). Das H<sub>2</sub>-Szenario kommt dagegen ohne PtG-Methan aus (Kral et al. 2021). Für die Regionen Europa ohne DE und Welt ohne EU wird angenommen, dass die entsprechenden Industrieprozesse auf Elektrolyse-Wasserstoff umgestellt werden, wodurch PtG-Methan hier keine Rolle spielt (Teske et al. 2019).

### 6.8.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 24 zeigt den Rohstoffbedarf in Gramm für die Herstellung von 1 Tonne PtG-Methan. Der Rohstoffbedarf basiert auf dem, Modul „SNG (CH<sub>4</sub>), gaseous, methanisation (DAC, PtX)“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)) und unterscheidet sich nicht zwischen den Regionen. Der Bedarf beinhaltet die Methanisierungsanlage und einen Gasspeicher mit 10.000 l Volumen. Ressourcen, die für den Betrieb benötigt werden, wie Energie und Wasserstoff, sowie Abfallprodukte werden hier nicht berücksichtigt.

Unter den betrachteten Rohstoffen haben, je nach Szenario und Jahr, Beton mit rund 34 - 70 % und Stahl mit 28 - 60 % die größten Anteile am spezifischen Rohstoffbedarf. Der Rohstoffbedarf von Aluminium nimmt rund 1-3 % ein. Zuzüglich werden kleine Mengen Kupfer sowie sonstige Rohstoffe (Steinwolle und Chemikalien) benötigt.

**Tabelle 24: Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t PtG-Methan**

Szenario	Jahr	Aluminium	Kupfer	Stahl	Beton	Sonstiges
<b>Late</b>	2030	30,08	3,44	721,42	1.685	29,04
<b>Late</b>	2040	58,89	3,44	1.307	1.685	58,18
<b>Late</b>	2050	41,78	3,44	959,39	1.685	40,87
<b>Supreme</b>	2030	28,08	3,05	668,29	1.685	27,17

Szenario	Jahr	Aluminium	Kupfer	Stahl	Beton	Sonstiges
Supreme	2040	117,89	2,70	2.484	1.685	118,15
Supreme	2050	57,50	2,39	1.246	1.685	57,19

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

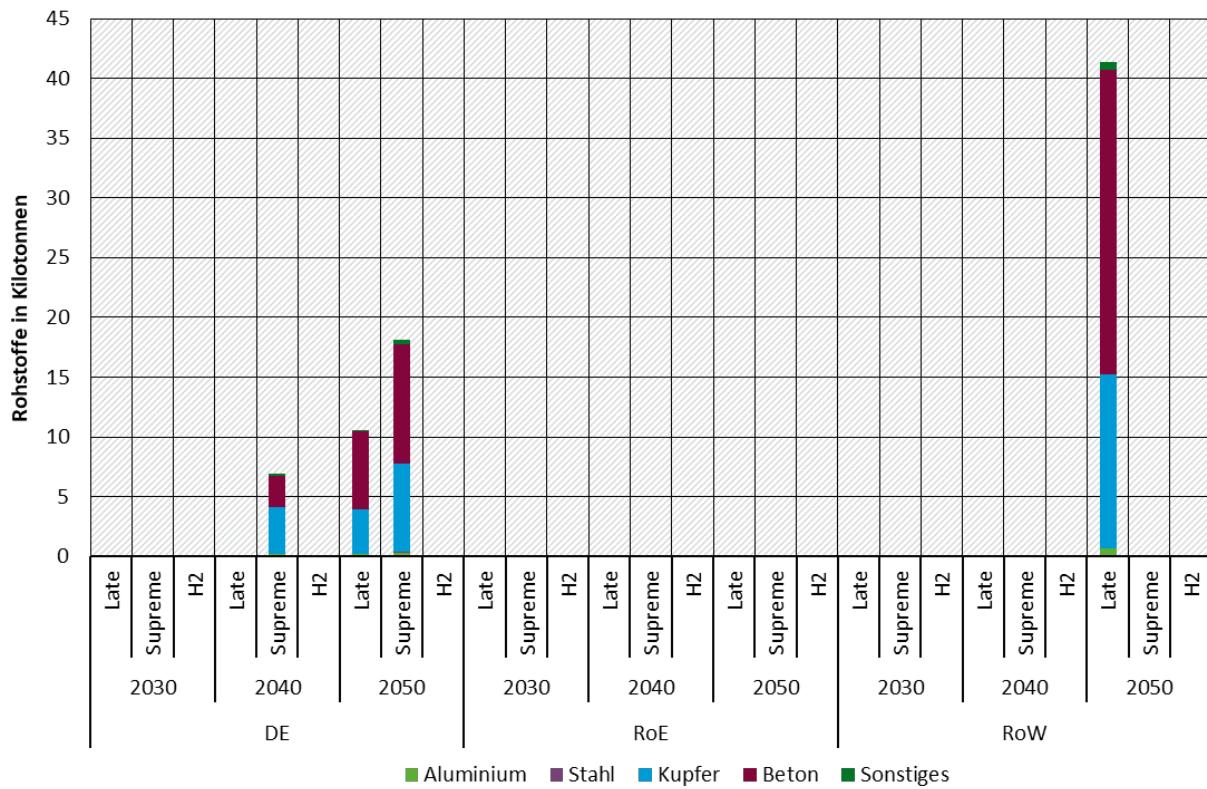
## 6.8.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für die Methanisierung ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Tonne herstelltem PtG-Methan mit den entsprechend benötigten PtG-Methanmengen im jeweiligen Szenario, Jahr und Region (siehe Tabelle 46 in Anhang A.7). Für die Methanisierung werden die Rohstoffbedarfe nach der in den Regionen tatsächlichen anfallenden Produktion dargestellt und enthalten Exporte in andere Regionen. In Kapitel 6.17.2 wird zudem für Deutschland und die EU ohne DE der Rohstoffaufwand der PtX-Importe aggregiert ausgewertet.

Auf Grund des schnellen Ausbaus erneuerbarer Energien im GreenSupreme-Szenario kann bereits ab 2040 PtG-Methan in relevanten Mengen in Deutschland hergestellt werden. Es sind in diesem Szenario daher keine Importe notwendig. Im GreenLate-Szenario kann dagegen erst 2050 PtG-Methan in Deutschland hergestellt werden. Die produzierten Mengen reichen jedoch nicht aus, um den hohen Bedarf im Jahr 2050 zu decken, weshalb rund 15 Millionen Tonnen an PtG-Methan aus der Welt ohne EU importiert werden. Der Anteil der Importe am deutschen Gesamtbedarf liegt dabei im Jahr 2050 bei etwa 80 %.

Wie Abbildung 23 zeigt, liegt in Deutschland der Rohstoffbedarf zur Herstellung von PtG-Methan im Jahr 2050 im GreenSupreme-Szenario bei mehr als 18.000 Tonnen; das entspricht dem 1,7-fachen verglichen mit dem Rohstoffbedarf im Green-Late-Szenario (ohne Importe). In der Welt ohne EU fällt der Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario 2050 mit insgesamt rund 41.000 Tonnen an Rohstoffen ins Gewicht und besteht ausschließlich aus Exporten nach Deutschland.

**Abbildung 23: Rohstoffbedarf für die Produktion von PtG-Methan, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.9 Methanolsynthese

Die Methanolsynthese beschreibt hier die chemische Umwandlung von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasserstoff ( $\text{H}_2$ ) zu Methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$  oder  $\text{MeOH}$ ). Im Folgenden wird eine einstufige Direkt-Methanolsynthese angesetzt.

Der PtL-Prozess besteht aus einer vorgeschalteten  $\text{CO}_2$ -Abscheidung, gefolgt von der Methanolsynthese im Reaktor und einer Separationskolonne. In der  $\text{CO}_2$ -Abscheidung wird der benötigte Kohlenstoff, der aus der Atmosphäre stammt, in einer DAC-Anlage in der unmittelbaren Nähe zur Syntheseanlage bereitgestellt. Für Kohlendioxid und Wasserstoff werden zudem Kurzzeitspeicher angenommen, die einen weitgehend kontinuierlichen Betrieb der Syntheseanlagen ermöglichen.

Methanol wird in allen Szenarien und Regionen als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. Es wird beispielsweise über die Methanol-to-Olefine-Route (MTO) genutzt, um bei der Herstellung von Ethylen und weiteren Olefinen fossile Feedstocks zu ersetzen. Für alle Green-Szenarien wird in Deutschland ein über die Zeit gleichbleibender Rohstoffbedarf für die chemische Industrie angenommen, der bis 2050 komplett auf strombasierte Ausgangsstoffe umgestellt wird. Diese Annahme impliziert entweder eine konstante Produktionsmenge oder das Ausgleichen zusätzlicher Bedarfe durch Effizienzsteigerungen (Purr et al. 2019). Im  $\text{H}_2$ -Szenario wird dagegen ein fallender Rohstoffbedarf für die chemische Industrie in Deutschland angenommen, der auch hier im Jahr 2050 komplett durch PtL-Methanol gedeckt wird. Für die Berechnung des Bedarfs an PtL-Methanol für die Regionen Welt ohne EU und EU ohne DE wurde angenommen, dass fossile Feedstocks bis 2050 komplett durch PtL-Methanol ersetzt werden, diese aber insgesamt bis 2050 für beide Regionen in allen Szenarien fallen. Die Rate, mit der die fossilen Feedstocks ersetzt werden, wurde aus GreenSupreme für das  $1,5^\circ\text{C}$ -Szenario bzw. aus

GreenLate für das 2,0°C-Szenario übernommen. Das benötigte Methanol wird in den Green-Szenarien nur in der Region Welt ohne EU produziert und nach Deutschland und EU ohne Deutschland exportiert. Im H<sub>2</sub>-Szenario wird PtL-Methanol dagegen jeweils in den Regionen produziert, in denen es genutzt wird.

### 6.9.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 25 zeigt den Rohstoffbedarf in Gramm für die Herstellung von einer Tonne PtL-Methanol. Der Rohstoffbedarf basiert auf Modul „methanol, one-step-process (DAC, PtX)“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)) und unterscheidet sich nicht zwischen den Regionen. Er beinhaltet die Anlage zur Methanolsynthese und wie bei der Methanisierungsanlage (Kap. 6.8) einen Gasspeicher mit 10.000 l Volumen.

Der Rohstoffbedarf des PtL-Methanols besteht zum größten Teil aus Stahl und Eisen (über alle Szenarien und Jahre im Mittel ca. 72 %), gefolgt von Beton (durchschnittlich 19 % über alle Jahre und Szenarien). Neben einigen Dämm- und Kunststoffen und Sand werden für die Methanolproduktion ebenfalls in geringem Maße Aluminium, Zinn, Zink, Nickel, Blei, Kupfer und die Metalle Silber und Tantal benötigt.

**Tabelle 25: Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t PtL-Methanol**

Szenario	Jahr	Aluminium	Eisen und Stahl	Kupfer	Blei	Nickel	Beton	Tantal	Zinn	Zink	Dämmstoff	Kunststoff	Sand	Sonstiges
H <sub>2</sub>	2030	13,18	794,14	3,04	0,09	0,03	223,96	0,02	0,11	2,23	18,28	13,54	0,72	59,82
H <sub>2</sub>	2040	24,54	1.007,01	2,94	0,09	0,02	216,24	0,02	0,11	2,23	29,02	13,07	0,69	58,33
H <sub>2</sub>	2050	16,9	833,45	2,83	0,09	0,02	208,52	0,02	0,11	2,23	21,47	12,6	0,67	55,92
Late	2030	13,64	821,53	3,15	0,1	0,03	231,69	0,02	0,12	2,23	18,91	14	0,74	61,89
Late	2040	26,29	1.078,94	3,15	0,1	0,03	231,69	0,02	0,12	2,23	31,1	14	0,74	62,5
Late	2050	18,78	926,05	3,15	0,1	0,03	231,69	0,02	0,12	2,23	23,86	14	0,74	62,13
Supreme	2030	12,09	728,1	2,79	0,09	0,02	205,34	0,01	0,1	2,23	16,76	12,41	0,66	54,85
Supreme	2040	20,65	847,49	2,47	0,08	0,02	181,99	0,01	0,09	2,22	24,43	11	0,58	49,09
Supreme	2050	13,07	644,68	2,19	0,07	0,02	161,29	0,01	0,08	2,22	16,61	9,75	0,52	43,26

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

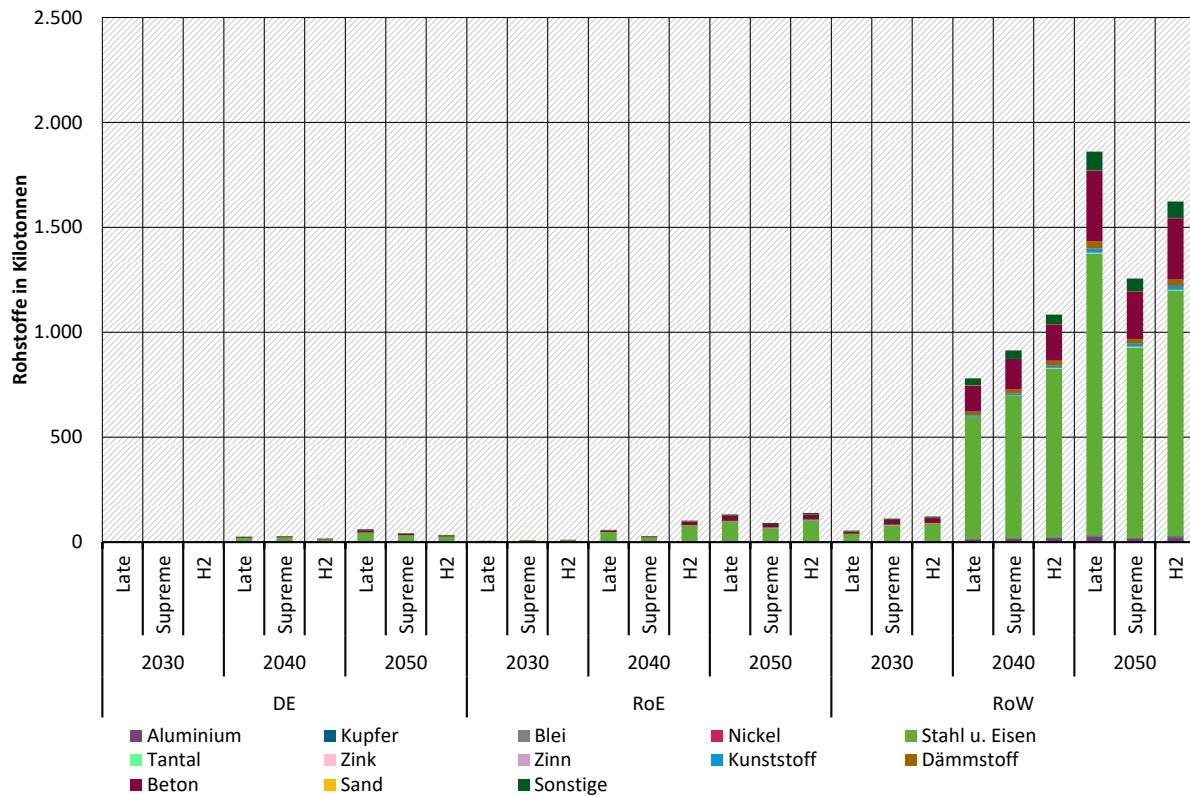
### 6.9.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für die Methanolsynthese ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Tonne hergestelltem PtL-Methanol mit den entsprechend benötigten PtL-Methanolmengen im jeweiligen Szenario, Jahr und Region (siehe Tabelle 47 in Anhang A.8). Für die Methanolsynthese werden zwei unterschiedliche Auswertungsperspektiven präsentiert; zunächst die Rohstoffbedarfe nach dem in den Regionen tatsächlichen anfallenden Verbräuchen an Methanol und zusätzlich die Rohstoffbedarfe differenziert nach den eigentlichen Produktionsorten. In Kapitel 6.17.2 wird zudem für Deutschland und die EU ohne DE der Rohstoffaufwand der PtX-Importe aggregiert ausgewertet.

Abbildung 24 zeigt den Rohstoffbedarf für die Methanolsynthese nach Nutzungsart in den jeweiligen Regionen. Der abgebildete Rohstoffbedarf schließt demnach die Eigenproduktion der Regionen als auch Rohstoffbedarfe ein, die aufgrund von Importen in anderen Regionen anfallen.

PtL-Methanol wird im H<sub>2</sub>-Szenario innerhalb der Regionen hergestellt, es gibt daher in diesem Szenario keine Im- bzw. Exporte. In den GreenSupreme- und GreenLate-Szenarien hingegen, findet die Produktion von PtL-Methanol ausschließlich in der Welt ohne EU statt. Die Importe nach Deutschland und in die EU ohne DE, in den GreenLate- und GreenSupreme-Szenarien, stammen somit aus der Welt ohne EU.

**Abbildung 24: Rohstoffbedarf für die Produktion von PtL-Methanol, nach Nutzungsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In Deutschland steigt der Methanolbedarf im Jahr 2050 auf rund 48 Mio. Tonnen im GreenSupreme- und GreenLate-Szenario, das entspricht rund 46 % des Bedarfs in der Region EU ohne DE. Der damit einhergehende Rohstoffbedarf liegt im Jahr 2050 im GreenLate-Szenario mit 61 kt am höchsten. Bei GreenSupreme liegt der Rohstoffbedarf in Deutschland im Jahr 2050 bei 43 kt und im H<sub>2</sub>-Szenario bei 35 kt.

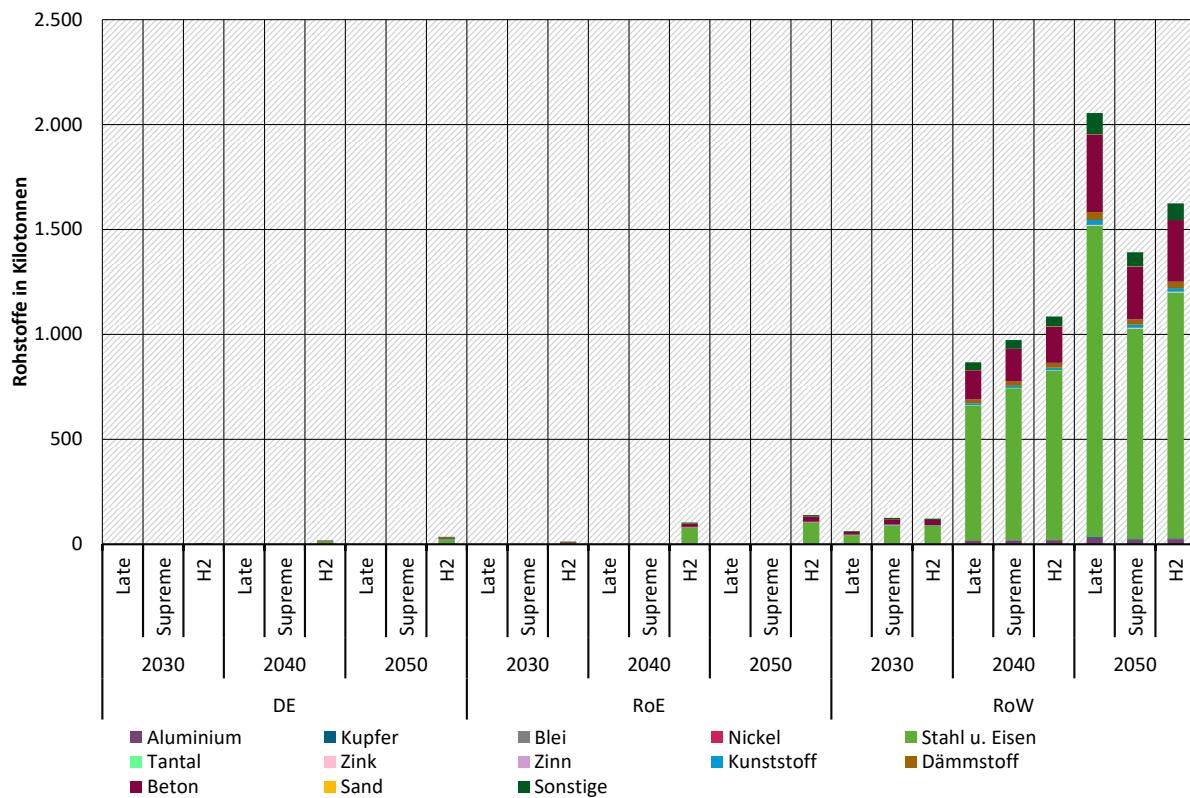
In der EU ohne DE beläuft sich der PtL-Methanol-Bedarf im Jahr 2050 auf 103 Mio. Tonnen für die Szenarien GreenSupreme und GreenLate sowie auf 120 Mio. Tonnen für das H<sub>2</sub>-Szenario. Eine Herstellung von PtL-Methanol in der EU ohne DE ist allerdings nur im H<sub>2</sub>-Szenario vorgesehen, für die anderen Szenarien wird ein Import aus der Welt ohne EU angenommen. Der Rohstoffbedarf liegt für die Region EU ohne DE im Jahr 2050 zwischen 92 kt (GreenSupreme) und 139 kt (H<sub>2</sub>-Szenario).

Für die Welt ohne EU steigt die angenommene Erzeugung von PtL-Methanol bis 2050 auf rund 1,4 Milliarden Tonnen im H<sub>2</sub>- und GreenSupreme-Szenario und auf rund 1,5 Milliarden Tonnen im GreenLate-Szenario.

Abbildung 25 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für die Erzeugung von PtL-Methanol, die nach dem in den jeweiligen Regionen zwischen 2030 und 2050 anfallen. Diese Darstellung bezieht sich auf

den Ort der Produktion und enthält daher sowohl Eigenerzeugung als auch die Produktion von Exporten.

**Abbildung 25: Rohstoffbedarf für die Produktion von PtL-Methanol, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In der EU ohne DE steigt der Rohstoffbedarf zur Herstellung von PtL-Methanol im Jahr 2050 auf rund 139 kt (ausschließlich im H<sub>2</sub>-Szenario).

Der Rohstoffbedarf in der Welt ohne EU im Jahr 2050 liegt im GreenSupreme-Szenario mit rund 1,4 Millionen Tonnen am niedrigsten. Im GreenLate-Szenario liegt der Rohstoffbedarf mit rund 2 Millionen Tonnen am höchsten.

Für die drei Szenarien wurde in der Welt ohne EU eine Zunahme des Rohstoffbedarfs bis 2050 um das 11 (GreenSupreme) bis 33-fache (GreenLate), verglichen mit dem Jahr 2030, errechnet.

## 6.10 FT-Synthese

Die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) ist ein großtechnisches Verfahren zur Herstellung flüssiger Kohlenwasserstoffe. Aus Kohlendioxid und Wasserstoff wird zunächst in einer "Reverse-Watergas-Shift"-Reaktion ein Synthesegas hergestellt. Das Synthesegas wird anschließend über Kobalt- oder Eisenkatalysatoren bei Temperaturen von 200-300°C und Drücken bis zu 40 bar zu langkettigen Kohlenwasserstoffen umgesetzt, die als synthetische Kraftstoffe und Energieträger verwendet werden können. Um FT-Kraftstoffe weitgehend treibhausgasneutral herzustellen, unterstellen wir für die Produktion im Folgenden die Power-to-Liquid (PtL)-FT-Synthese, bei der technisch gewonnenes CO<sub>2</sub> und elektrolytisch gewonnener Wasserstoff eingesetzt wird.

Der Power-to-Liquid-Prozess besteht aus einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung, gefolgt von einer Synthesegaserzeugung, der Fischer-Tropsch-Synthese, einem Hydrocracker sowie einer

Produktaufbereitung/-raffination. Je nach Art der Synthesegaserzeugung, kommt noch ein Dampfkreislauf hinzu (Albrecht et al. 2017). In der vorgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird der benötigte Kohlenstoff per DAC aus der Luft gewonnen.

FT-Kraftstoffe werden in allen Szenarien und Regionen ausschließlich im Verkehr eingesetzt (national und international). FT-Kraftstoffe werden für alle Szenarien lediglich in der Region Welt ohne EU produziert und exportiert. Für die Berechnung der Szenarien wurde eine Anlagenlebensdauer von 25 Jahren (alle Jahre) unterstellt (Liebich et al. 2020).

Des Weiteren wurden für die Berechnung der absoluten Ergebnisse Anpassungen bezüglich der Region Welt ohne EU für das Jahr 2030 auf Grund unterschiedlicher Annahmen in den zugrunde gelegten Basisdaten getroffen (unterschiedliche Narrative RESCUE, (Teske et al. 2019) in Bezug auf Anteile an FT- oder Biokraftstoffen).

### 6.10.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 26 zeigt den Rohstoffbedarf in Gramm für die Herstellung von einer Tonne PtL-FT-Kraftstoff. Der Rohstoffbedarf basiert auf dem Modul „fuel, liquid, Fischer-Tropsch synthesis (DAC, PtX)“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)) und unterscheidet sich nicht zwischen den Regionen. Rohstoffe, die für den Betrieb benötigt werden, wie Energie und Wasserstoff, sowie Abfallprodukte werden hier nicht berücksichtigt.

Die spezifischen Rohstoffbedarfe sind konstant über alle Regionen, unterscheiden sich jedoch nach Szenarien und Jahren. Den größten Anteil am Rohstoffbedarf stellt die Kategorie Stahl dar, die über die Szenarien und Jahre betrachtet rund 90 % des Rohstoffbedarfs ausmacht. Die Kategorie Sonstiges, die zwischen 2-5 % einnimmt, beinhaltet zu 95 % Steinwolle und 5 % Chemikalien. In geringen Mengen werden zudem Aluminium (ca. 4 %), Beton (3 %) und Kunststoffe (< 0,2 %) benötigt.

**Tabelle 26: Rohstoffbedarf in g für die Herstellung von 1 t FT-Kraftstoff**

Szenario	Jahr	Aluminium	Stahl	Kunststoff	Beton	Sonstiges
H <sub>2</sub>	2030	31,64	788	1,55	37,04	72,27
H <sub>2</sub>	2040	61,13	1.383	1,49	37,04	102
H <sub>2</sub>	2050	41,43	977	1,44	37,04	82,11
<b>Late</b>	2030	36,60	894	1,60	37,04	77,33
<b>Late</b>	2040	73,27	1.640	1,60	37,04	114
<b>Late</b>	2050	51,49	1.197	1,60	37,04	92,39
<b>Supreme</b>	2030	29,01	722	1,42	37,04	69,53
<b>Supreme</b>	2040	51,44	1.164	1,26	37,04	92,12
<b>Supreme</b>	2050	32,05	756	1,11	37,04	72,42

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

### 6.10.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für die FT-Synthese ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Tonne hergestelltem FT-Kraftstoff mit den entsprechend

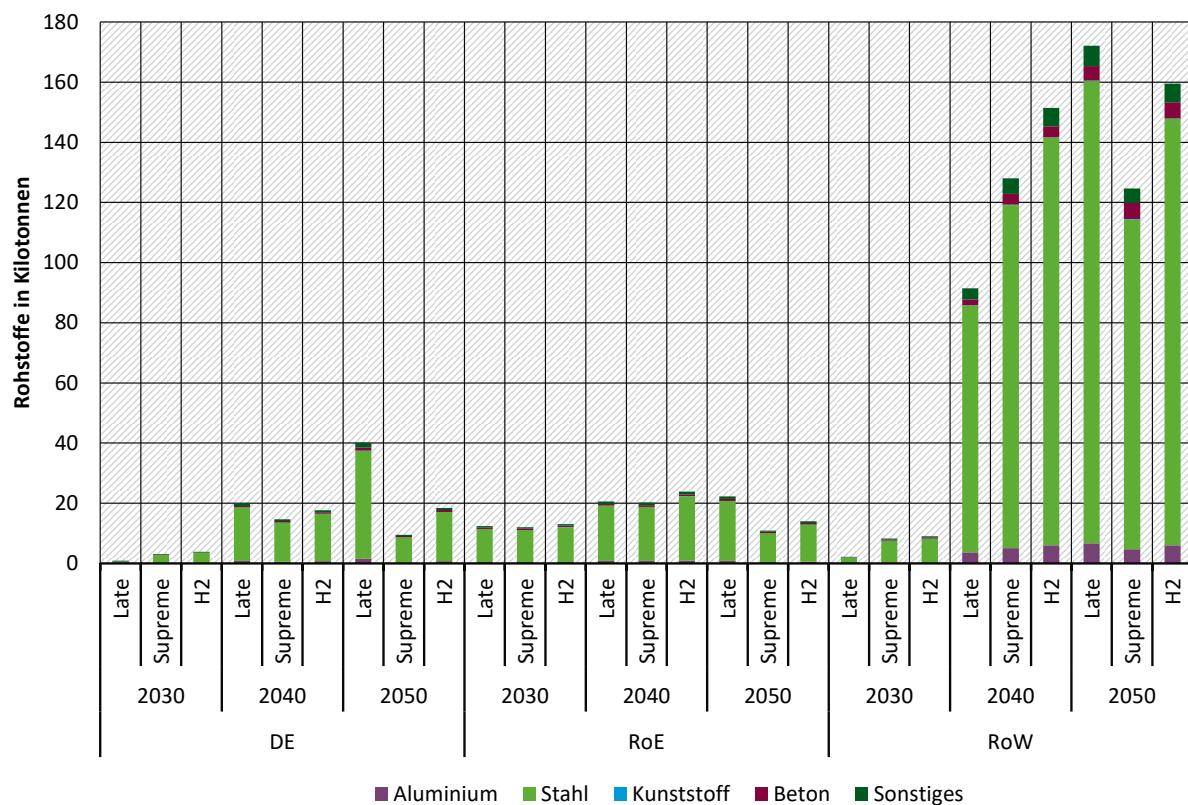
benötigten FT-Kraftstoffmengen im jeweiligen Szenario, Jahr und Region (siehe Tabelle 48 in Anhang A.9).

In Deutschland werden in den Green-Szenarien FT-Kraftstoffe bereits ab 2030 für den internationalen Flugverkehr genutzt und ab 2040 ebenfalls im internationalen Schiffsverkehr eingesetzt. Im GreenSupreme-Szenario kommen FT-Kraftstoffe darüber hinaus ab 2030 auch im nationalen Verkehr zum Einsatz. Im GreenLate-Szenario kommen sie hier erst 2050 zum Einsatz. (s. Kapitel 2; zu den einzelnen Szenarien siehe (Purr et al. 2019))

Für die FT-Synthese werden zwei unterschiedliche Auswertungsperspektiven präsentiert; zunächst die Rohstoffbedarfe nach den Nutzungsorten und zusätzlich die Rohstoffbedarfe differenziert nach den eigentlichen Produktionsorten. In Kapitel 6.17.2 wird zudem für Deutschland und die EU ohne DE der Rohstoffaufwand der PtX-Importe aggregiert ausgewertet.

Abbildung 26 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für den Einsatz von FT-Kraftstoffen in Deutschland, in der EU ohne DE und in der Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. Wie bereits erläutert, werden FT-Kraftstoffe ausschließlich in der Region Welt ohne EU produziert (wie Abbildung 27 entnommen werden kann). Der Bedarf an FT-Kraftstoffen in Deutschland und in der EU ohne DE wird über Importe gedeckt.

**Abbildung 26: Rohstoffbedarf für die Produktion von FT-Produkten, nach Nutzungsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In Deutschland steigt der PtL-FT-Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 auf 11 Millionen Tonnen im GreenSupreme-Szenario, auf knapp 17 Millionen Tonnen im H<sub>2</sub>-Szenario und auf bis zu 30 Millionen Tonnen im GreenLate-Szenario an. Für die EU ohne DE liegt der PtL-FT-Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 bei rund 13 Millionen Tonnen im H<sub>2</sub>- bzw. GreenSupreme-Szenario und im GreenLate-Szenario bei rund 17 Millionen Tonnen. Für die Welt ohne EU liegt

der FT-Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 bei rund 147 Millionen Tonnen im H<sub>2</sub>- bzw. GreenSupreme-Szenario und im GreenLate-Szenario bei 129 Millionen Tonnen.

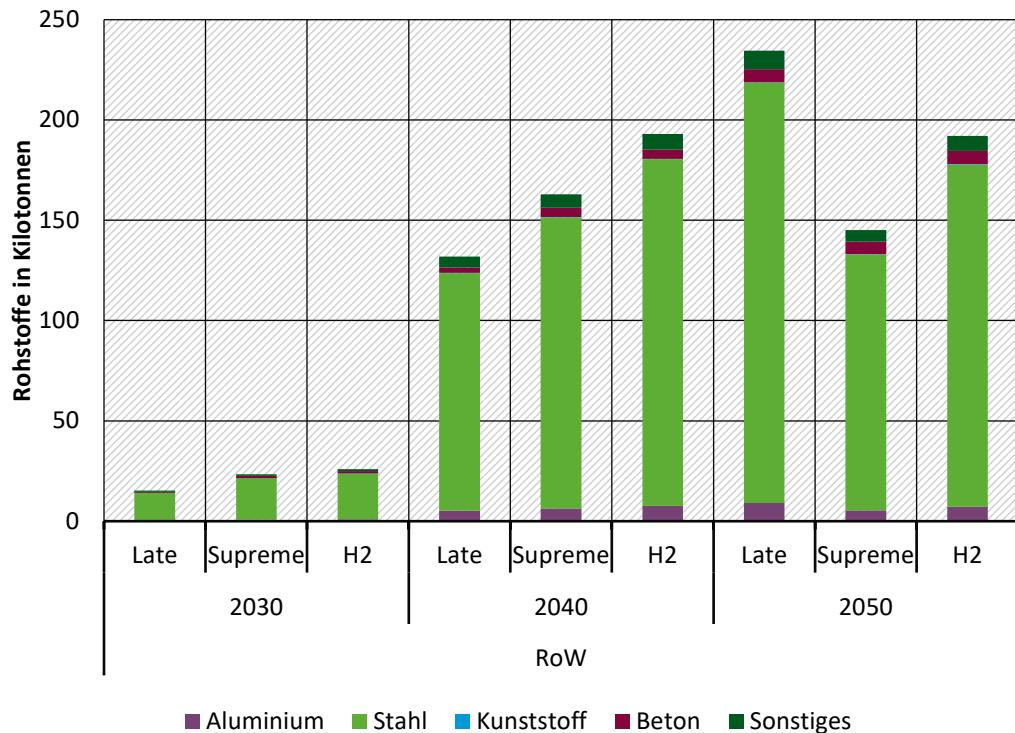
Daraus folgt der höchste Rohstoffbedarf für den Nutzungsraum Deutschland im GreenLate-Szenario im Jahr 2050 mit 40 kt. Das Szenario beschreibt einen Pfad, der eine Zunahme des Rohstoffbedarfs Deutschlands für die Produktion von FT-Kraftstoffen um das 54-fache im Vergleich zu 2030 erfordert. Im Vergleich dazu steigt der Bedarf im GreenSupreme-Szenario im Jahr 2040 auf rund 15 kt an und sinkt im Jahr 2050 auf rund 9 kt. Im H<sub>2</sub>-Szenario steigt der Rohstoffbedarf von 2030 bis 2050 von rund 4 kt auf 18 kt.

Für die EU ohne DE wird im GreenLate-Szenario ein Rohstoffbedarf von rund 22 kt im Jahr 2050 benötigt. Im Vergleich dazu wird im GreenSupreme-Szenario für dasselbe Jahr nur rund die Hälfte der Rohstoffe benötigt und im H<sub>2</sub>-Szenario etwa 63 % des Rohstoffbedarfs des GreenLate-Szenarios.

Der Rohstoffbedarf in der Welt ohne EU liegt im Jahr 2050 für das GreenLate-Szenario ebenso am höchsten, verglichen mit den anderen beiden Szenarien. Er liegt bei rund 172 kt. Der Rohstoffbedarf für das GreenSupreme-Szenario liegt bei 72 % und jener des H<sub>2</sub>-Szenarios bei 93 % des Bedarfs im GreenLate-Szenario. Im Jahr 2050 wird im GreenLate-Szenario beinahe das 80-fache an Rohstoffen benötigt wie im Jahr 2030.

Abbildung 27 zeigt den Rohstoffbedarf nach Produktionsort, der bei der Produktion von PtL-FT-Kraftstoffen in der Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfällt. Diese Darstellung enthält daher sowohl Eigenerzeugung als auch die Produktion von Exporten. Werden die Ergebnisse mit dem Rohstoffbedarf nach Nutzungsraum in Abbildung 26 verglichen, so zeigt sich, dass 2050 zwischen 7 % (GreenSupreme-Szenario) und 17 % (GreenLate-Szenario) der PtL-FT-Kraftstoffe, die in der Welt ohne EU hergestellt werden, in Deutschland genutzt werden. Die Anteile der EU ohne DE an der Produktion in der Welt ohne EU liegen im Jahr 2030 zunächst sehr hoch (bis zu 81 % im GreenLate-Szenario) und sinken schließlich im Jahr 2050 auf zwischen 7 % (im H<sub>2</sub>-Szenario) und 9 % (im GreenLate-Szenario).

**Abbildung 27: Rohstoffbedarf für die Produktion von FT-Produkten, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.11 Solarthermische Kraftwerke

Solarthermie Kraftwerke (Concentrated Solar Power oder kurz CSP) sind Kraftwerke zur Nutzung konzentrierter Sonnenenergie. Darunter wird die Nutzung der Wärmeenergie von auf einen Brennpunkt oder eine Brennlinie gebündelter Sonneneinstrahlung verstanden.

Im Brennpunkt wird ein Wärmeträgerfluid (engl. Heat Transfer Fluid oder HTF) erhitzt. Dabei können mehr als 500°C erreicht werden. Der gebräuchlichste Anwendungsfall für die so gewonnene Wärme ist der Antrieb einer Dampfturbine zur Stromerzeugung. Aber auch die direkte Nutzung, Kälteerzeugung, Produktion von Brennstoffen oder Wasserreinigung sind möglich. Für einen zeitversetzten Einsatz können thermische Zwischenspeicher genutzt werden. Aktuelle Solarthermie Kraftwerke erreichen Leistungen von 50 bis 250 MW (Liebich et al. 2020; Quaschning 2019).

Die zwei aktuell vorherrschenden Anlagenkonzepte sind Parabolrinnen- und Solarturmkraftwerke. Der größte Teil der Anlagen steht in Spanien, aber auch in den USA, in Südafrika, sowie der gesamten MENA-Region sind Anlagen in Betrieb bzw. in Planung (HELIOSCSP 2020; Mahlangu und Thopil 2018; Quaschning 2019).

Die Anteile der Kraftwerkstypen liegen aktuell bei ca. 10 % Solarturm-Kraftwerken und 90 % Parabolrinnen-Kraftwerken. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde festgelegt, dass im GreenLate-Szenario das Verhältnis konstant bleibt und in den anderen Szenarien sich das Verhältnis bis 2050 vollständig zu Parabolrinnen-Kraftwerkstypen verschiebt. Die Annahme gilt gleichermaßen für die Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU. Für Deutschland sind in keinem Szenario Solarthermische Kraftwerke angenommen.

### 6.11.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 27 und Tabelle 28 zeigen den Rohstoffbedarf in Milligramm für eine kWh Strom aus CSP. Die Rohstoffbedarfe basieren auf den Modulen „electricity, at CSP, solar tower, with storage“ und „electricity, at CSP, solar trough, with storage“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Über die Jahre, Regionen und Szenarien bleiben die Infrastruktur-Aufwendungen unverändert entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Ressourcen, wie Energie und Wasser, sowie Abfallprodukte werden hier nicht berücksichtigt.

Für die Produktion einer kWh Strom aus einem Solarturm-Kraftwerk fallen Rohstoffbedarfe an, die sich zu 46 % aus Beton, zu 19 % aus Eisen und Stahl, zu 30 % aus der Kategorie Sonstiges und zu 4 % aus Sand und Kies zusammensetzen. Die Kategorie Sonstiges besteht zu überwiegendem Anteil aus Kaliumnitrat (81 %). Außerdem werden kleine Mengen Aluminium, Kupfer, Nickel, Zinn sowie Kunststoffe benötigt.

Für die Produktion von einer kWh Strom aus einem Parabolrinnen-Kraftwerke fallen ähnliche Rohstoffbedarfe an. Diese setzen sich zu 36 % aus Beton, zu 13 % aus Eisen und Stahl, zu 49 % aus der Kategorie Sonstiges und zu 3 % aus Sand und Kies zusammen. Auch hier besteht die Kategorie Sonstiges zu überwiegendem Anteil (86 %) aus Kaliumnitrat. Zudem werden kleine Mengen Aluminium, Kupfer, Nickel, Zinn sowie Kunststoffe benötigt.

Gemessen an einer kWh Strom aus CSP, fallen für Parabolrinnen-Kraftwerke nur 10 % des Aluminiumbedarfs an. Allerdings benötigen Parabolrinnen-Kraftwerke pro erzeugter kWh Strom etwa das 1.300-fache an Kupfer, das 8-fache an Eisen und Stahl, das 9-fache an Sand und Kies, das 11-fache an Zinn, das 13-fache an Nickel, das 4-fache an Kunststoffen und etwa 10-mal so viel Beton verglichen mit dem Rohstoffbedarf einer kWh aus Solartürmen.

**Tabelle 27: Rohstoffbedarf in mg pro kWh Strom aus CSP über Solarturm**

Szenario	Jahr	Alu-minium	Kupfer	Eisen und Stahl	Nickel	Zinn	Kunststoffe	Beton	Sand und Kies	Sonstiges
alle	alle	4,72	0,00	313,28	0,00	0,00	0,57	752,15	67,46	481,39

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

**Tabelle 28: Rohstoffbedarf in mg pro kWh Strom aus CSP über Parabolrinnen**

Szenario	Jahr	Alu-minium	Kupfer	Eisen und Stahl	Nickel	Zinn	Kunststoffe	Beton	Sand und Kies	Sonstiges
alle	alle	0,47	2,67	2.583	0,06	0,01	2,50	7.326	596,41	9.925

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

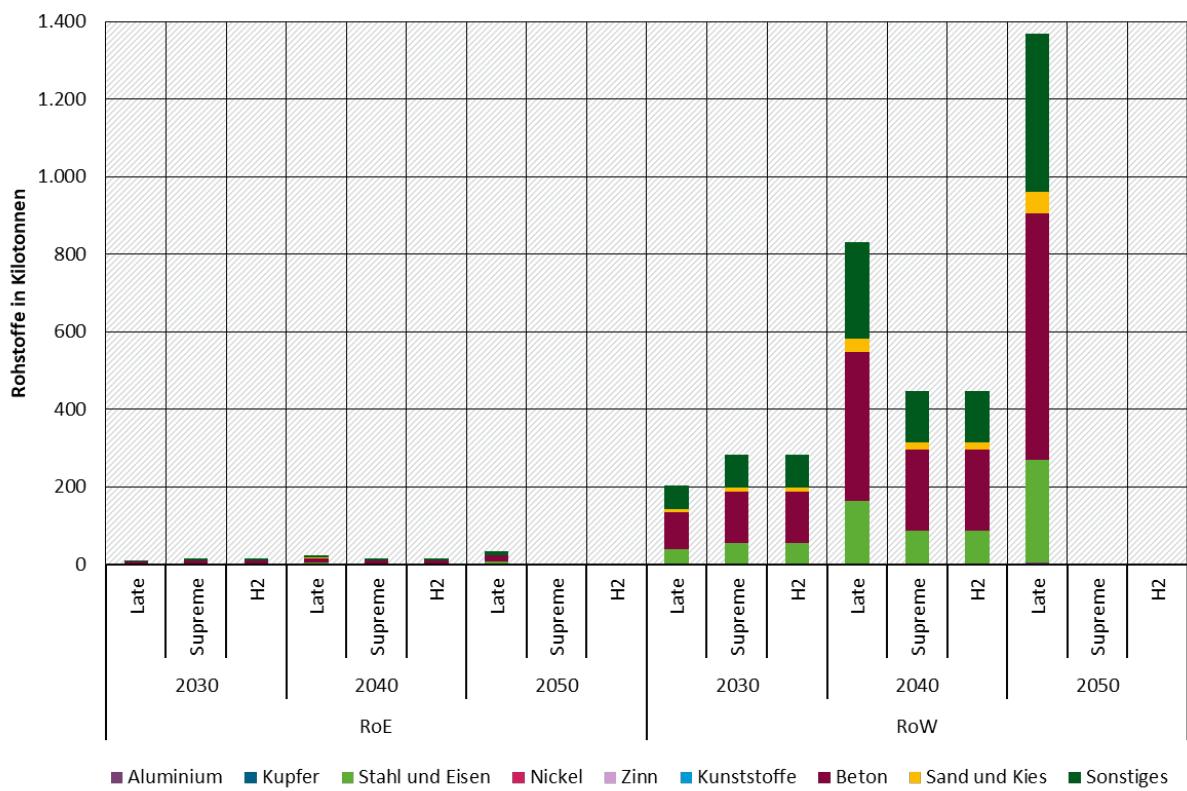
### 6.11.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für die Stromerzeugung mithilfe von CSP-Kraftwerken ergibt sich aus der Verrechnung der spezifischen Rohstoffbedarfe je kWh erzeugtem Strom, für Solartürme bzw. Parabolrinnen, mit der im entsprechenden Jahr, Szenario und Region vorgegebenen absoluten Stromerzeugung (TWh/a) (siehe Tabelle 49 für Solarturm-Kraftwerke und Tabelle 50 für Parabolrinnen-Kraftwerke, in Anhang A.10).

Abbildung 28 zeigt den absoluten Rohstoffbedarf für die Stromerzeugung über Solarturm-Kraftwerke. Die Erzeugung von Strom aus CSP über Solarturm-Kraftwerke ist im Vergleich zu Parabolrinnen-Kraftwerken gering und nur im GreenLate-Szenario in allen drei Jahren vertreten (wegen Annahme nur hier Verhältnis konstant). Im Zeitraum 2030 bis 2040 nimmt die Stromerzeugung in GreenSupreme und im H<sub>2</sub>-Szenario in der EU ohne DE um 7 % zu und in der Welt ohne EU um knapp 60 %. Im GreenLate-Szenario steigt die Stromerzeugung in der EU ohne DE bis zum Jahr 2050 um das Dreifache gegenüber 2030 und liegt bei rund 20 TWh pro Jahr. In der Region Welt ohne EU beläuft sich die Steigerung im GreenLate-Szenario zwischen 2030 und 2050 auf knapp das 7-fache und liegt bei 844 TWh pro Jahr. Für die anderen beiden Szenarien wird die Erzeugung von CSP vollständig über Parabolrinnen-Kraftwerke angenommen.

Die Rohstoffbedarfe sind dementsprechend in GreenLate am höchsten und liegen 2050 in der EU ohne DE bei rund 33 kt und in der Welt ohne EU bei knapp 1,4 Mio. t. In den beiden anderen Szenarien liegen die Rohstoffbedarfe im Jahr 2030 zunächst noch höher als in GreenLate. Im Jahr 2040 werden allerdings im GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenario, verglichen mit dem GreenLate-Szenario, nur 64 % des Rohstoffbedarfs in der EU ohne DE und 54 % des Rohstoffbedarfs in der Welt ohne EU benötigt.

**Abbildung 28: Rohstoffbedarf für die Produktion von CSP-Strom über Solarturm-Kraftwerke**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

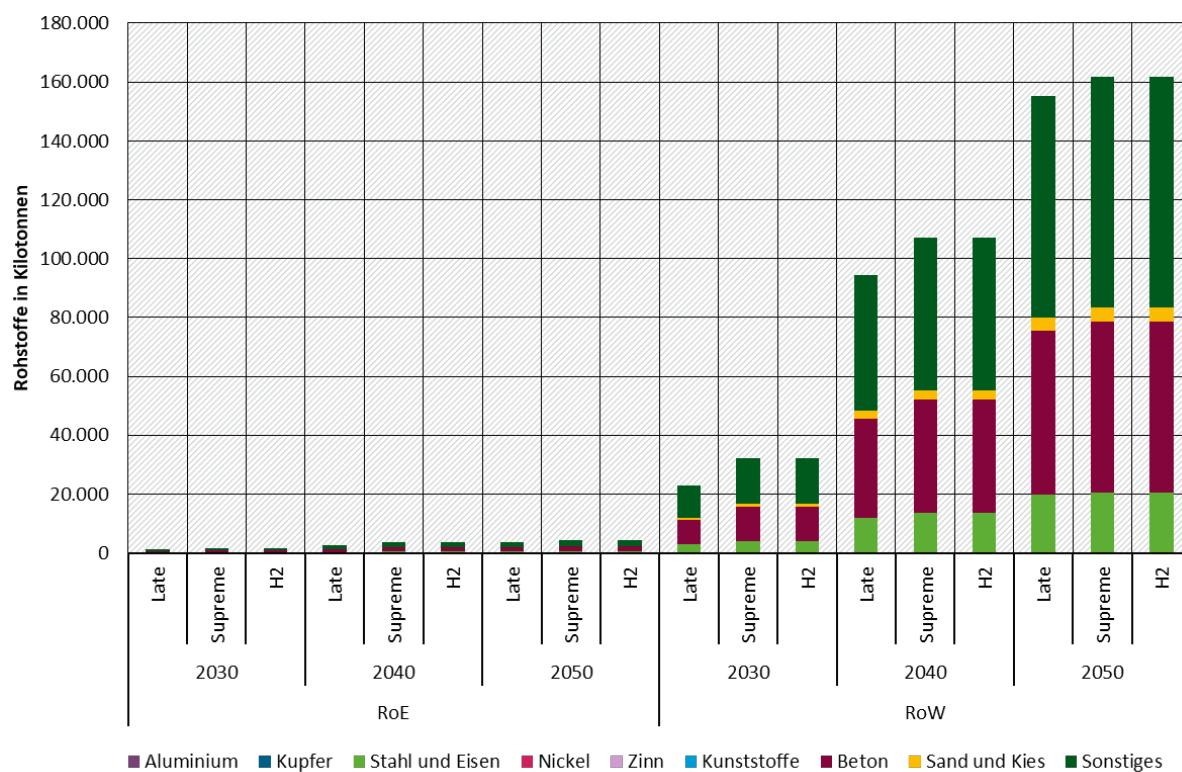
Abbildung 29 zeigt den Rohstoffbedarf für die Stromerzeugung über Parabolrinnen-Kraftwerke. Die Erzeugung von Strom aus CSP über diese Art von Kraftwerken ist im Vergleich zu den Solarturm-Kraftwerken höher. Das Verhältnis im GreenLate-Szenario bleibt entsprechend der Annahme konstant, in den anderen Szenarien lösen Parabolrinnen-Kraftwerke allmählich Solartürme ab und ersetzen diese im Jahr 2050 vollständig.

Im Zeitraum 2030 bis 2040 nimmt die Stromerzeugung in den GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenarien in der EU ohne DE um 125 % zu und in der Welt ohne EU um 234 %.

Im GreenLate-Szenario steigt die Stromerzeugung im gleichen Verhältnis wie bei den Solarturm-Kraftwerken, in der EU ohne DE um das Dreifache zwischen 2030-2050 auf rund 184 TWh pro Jahr, in der Welt ohne EU um knapp das 7-fache auf etwa 7.599 TWh pro Jahr.

Die Rohstoffbedarfe liegen im GreenLate-Szenario in allen Jahren und in beiden Regionen niedriger als in den anderen beiden Szenarien: 2050 in der EU ohne DE liegt der Bedarf bei rund 4 Mio. t und in der Welt ohne EU bei 155 Mio. t. In den beiden anderen Szenarien sind die Rohstoffbedarfe im Jahr 2030 in der EU ohne DE um 30 % höher und in der Welt ohne EU um fast 40 % höhere als in GreenLate. Im Jahr 2050 verringert sich der Abstand auf einen 17 % (EU ohne DE) bzw. 4 % (Welt ohne EU) höheren Rohstoffbedarf gegenüber GreenLate.

**Abbildung 29: Rohstoffbedarf für die Produktion von CSP-Strom über Parabolrinnen-Kraftwerken**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.12 Brennstoffzellen

Die Brennstoffzelle wandelt chemische Energie direkt in elektrische Energie, ähnlich einer Batterie. Im Gegensatz zu einer Batterie ist die Brennstoffzelle jedoch ein reiner Energiewandler und speichert selbst keine Energie. In einer Zelle wird abhängig von der eingesetzten Technologie eine bestimmte Spannung erzeugt, sodass der Brennstoffzelle Gleichstrom entnommen werden kann. Um eine gewünschte Spannung zu erreichen, werden mehrere Einzelzellen in Reihe geschaltet, sodass sich deren Einzelspannungen addieren. Diese Zusammensetzung mehrerer Einzelzellen wird Stack genannt (Kurzweil 2016).

Im Rahmen von REFINE werden zwei Technologievarianten der Wasserstoffbrennstoffzelle betrachtet: die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) und die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (PEMFC).

SOFC-Zellen können in Röhrenform, flach oder als ein wellenförmiger Schichtverbund ausgeführt werden. Sie werden im Vergleich zu anderen Brennstoffzelltechnologien bei hohen

Temperaturen von ca. 900°C betrieben, da bei diesen mit steigender Temperatur die Zellspannung zunimmt. Es werden Elektrodenmaterialien wie Steingut, Bornitrid, Porzellan oder leitfähige Keramiken eingesetzt, da diese eine hohe Temperaturbeständigkeit aufweisen (Kurzweil 2016). Häufig sind SOFC mit Abwärmenutzung kombiniert, sodass der Wirkungsgrad des Gesamtsystems auf bis zu 90 % gesteigert wird (Mehmeti et al. 2016). Daher finden SOFC insbesondere im stationären Bereich Anwendung. Für SOFC werden die nach (DERA 2019) kritischen Rohstoffe Strontium, Kobalt, Yttrium und Scandium benötigt. Es besteht derzeit keine Rezyklierbarkeit dieser Rohstoffe aus der SOFC, da diese oxidiert vorliegen und daher der wirtschaftliche Aufwand für den Recyclingprozess zu hoch ist (Viebahn et al. 2018).

In PEMFC (auch Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle PEFC genannt) wird eine protonenleitende Polymermembran als Elektrolyt eingesetzt. Diese hat zudem die Funktion des Katalysatorträgers und des Separators. Für die Elektroden wird meist platiniertes Kohlenpapier verwendet. Durch die hohe Leistungsdichte eignen sich PEMFC insbesondere für mobile Anwendungen, so sind PEMFC bereits in Serienfahrzeugen zu finden. Auch weißt die PEMFC gegenüber der SOFC deutlich niedrigere Betriebstemperaturen auf (Kurzweil 2016). In PEMFC werden die kritischen Rohstoffe Platin, Palladium und Ruthenium benötigt, welche nach Produktlebensende recycelt werden können (Viebahn et al. 2018).

In den Green-Szenarien kommen in Deutschland Brennstoffzellen weder mobil noch stationär zum Einsatz. In den Regionen EU ohne DE, sowie Welt ohne EU werden ebenso wie im H<sub>2</sub>-Szenario in Deutschland PEMFC im Straßenverkehr eingesetzt. Darüber hinaus kommen nur in den Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU in allen Szenarien SOFC- und PEMFC-Stacks zur stationären Stromerzeugung zum Einsatz. Diese spielen leistungsmäßig allerdings eine untergeordnete Rolle im Vergleich zur sonstigen Stromproduktion aus Wasserstoff. Im Jahr 2050 liegt der Anteil der Stromerzeugung aus Brennstoffzellen an der gesamten Stromerzeugung aus Wasserstoff bei 9 % in EU ohne DE im GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenario und bei 10 % im GreenLate-Szenario. Für die Welt ohne EU liegt dieser Anteil 2050 bei etwa 12 % in allen Szenarien. Es wird angenommen, dass der stationär mit Brennstoffzellen erzeugte Strom, in allen Jahren und Regionen, zu jeweils 50 % mit PEMFC und SOFC produziert wird.

### 6.12.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 29 zeigt den spezifischen Rohstoffbedarf in Gramm pro Wh Strom aus einer **PEMFC**. Die Rohstoffbedarfe basieren auf dem Modul „hydrogen, burned in polymer electrolyte membrane fuel cell 2kWe, future“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Die Bedarfe sind für die Regionen konstant, variieren über die Jahre und Szenarien entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Der spezifische Rohstoffbedarf beinhaltet Rohstoffe, die in den PEMFC verbaut sind, ohne Rohstoffe, die für den Betrieb benötigt werden.

Für die Produktion einer Wh Strom aus PEMFC fallen Rohstoffbedarfe an, die sich zu 73-74 % aus Eisen und Stahl, zu 6 % aus Aluminium, zu 5 % aus Kunststoffen, zu 3-4 % aus Kupfer sowie zu 12 % aus der Kategorie Sonstige zusammensetzen. Letztere besteht zu überwiegendem Anteil aus Grafit (59-61 %) und Phenolharz (15 %). Kleine Mengen weiterer, sonstiger Metalle umfassen Gold, Nickel, Platin, Silber, Tantal, Zinn, Zink, Blei. Des Weiteren werden kleine Mengen an Sanden und Dämmstoffen benötigt.

Die spezifischen Rohstoffbedarfe fallen zwischen 2030 und 2050 im GreenSupreme-Szenario um durchschnittlich ca. 18 % und im H<sub>2</sub>-Szenario um durchschnittlich ca. 8 %, während sie im GreenLate-Szenario konstant bleiben. Besonders stark ist die Reduktion des Rohstoffbedarfs mit 60 % für Platin, sowohl in GreenSupreme als auch im H<sub>2</sub>-Szenario. Auch die Metalle Kupfer, Gold,

Nickel, Silber, Tantal, Zinn, Zink und Blei sinken deutlich: ca. 21 % in GreenSupreme und ca. 7 % im H<sub>2</sub>-Szenario.

Tabelle 30 zeigt den spezifischen Rohstoffbedarf in Gramm pro Wh Strom aus einer **SOFC**. Die Rohstoffbedarfe basieren auf dem ecoinvent-Modul „hydrogen, burned in solid oxide fuel cell 125kWe, future“. Die Bedarfe sind für die Regionen konstant, variieren über die Jahre und Szenarien entsprechend der Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Der spezifische Rohstoffbedarf beinhaltet Rohstoffe, die in den SOFC verbaut sind, ohne Rohstoffe, die für Betrieb benötigt werden.

Für die Produktion einer Wh Strom aus SOFC fallen Rohstoffbedarfe an, die sich zu 85-87 % aus Eisen und Stahl, zu 5 % aus Aluminium, zu 2 % aus Kupfer, zu 1 % aus Nickel, zu 2-3 % aus sonstigen Metallen sowie zu 2-3 % aus der Kategorie Sonstige zusammensetzen. Letztere besteht unter anderem aus Chlor und Kaliumkarbonat. Kleine Mengen weiterer, sonstiger Metalle umfassen unter Gold, Nickel, Silber, Tantal, Zinn, Zink, Blei, Chrom, Titan und Zirkonium. Des Weiteren werden kleine Mengen an Kunststoffen, Sanden und Dämmstoffen benötigt.

Die spezifischen Rohstoffbedarfe fallen zwischen 2030 und 2050 im GreenSupreme-Szenario um durchschnittlich ca. 16 % und im H<sub>2</sub>-Szenario um durchschnittlich ca. 5 %, während sie im GreenLate-Szenario konstant bleiben. Die Metalle Eisen und Stahl, Kupfer, Gold, Silber, Tantal, Zinn, Zink und Blei sinken deutlich: um ca. 21 % in GreenSupreme und ca. 7 % im H<sub>2</sub>-Szenario.

**Tabelle 29: Rohstoffbedarf in g pro Wh Strom aus PEMFC**

Szenario	Jahr	Eisen und Stahl	Aluminium	Kupfer	Gold	Nickel	Platin	Silber	Tantal	Zinn	Zink	Blei	Sand	Kunststoffe	Dämmstoffe	Sonstige
H <sub>2</sub>	2030	715,44	56,74	35,45	0	0,06	0,01	0,09	0,07	0,27	0,25	0,22	2,18	50,21	0	114,45
H <sub>2</sub>	2040	713,46	56,14	34,26	0	0,06	0	0,09	0,07	0,26	0,24	0,21	2,16	50,1	0	114,06
H <sub>2</sub>	2050	711,48	55,53	33,07	0	0,05	0	0,08	0,07	0,25	0,23	0,2	2,13	50	0	113,67
Late	2030	717,42	57,34	36,63	0	0,06	0,02	0,09	0,08	0,28	0,26	0,22	2,2	50,32	0	114,84
Late	2040	710,67	55,28	32,58	0	0,05	0,01	0,08	0,07	0,25	0,23	0,2	2,12	49,95	0	113,51
Late	2050	704,69	53,46	28,99	0	0,05	0	0,07	0,06	0,22	0,2	0,18	2,05	49,62	0	112,34
Supreme	2030	699,38	51,84	25,81	0	0,04	0	0,06	0,05	0,19	0,18	0,16	1,99	49,33	0	111,29
Supreme	2040	715,44	56,74	35,45	0	0,06	0,01	0,09	0,07	0,27	0,25	0,22	2,18	50,21	0	114,45
Supreme	2050	713,46	56,14	34,26	0	0,06	0	0,09	0,07	0,26	0,24	0,21	2,16	50,1	0	114,06

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

**Tabelle 30: Rohstoffbedarf in g pro Wh Strom aus SOFC**

Szenario	Jahr	Eisen und Stahl	Aluminium	Kupfer	Gold	Nickel	Platin	Silber	Tantal	Zinn	Zink	Blei	Sand	Kunststoffe	Dämmstoffe	Sonstige
H <sub>2</sub>	2030	1.522,65	95,07	32,43	0	14,7	0,08	0,07	0,24	0,36	0,2	0	1,48	4,66	42,99	37,23
H <sub>2</sub>	2040	1.470,15	92,36	31,35	0	14,6	0,08	0,06	0,24	0,35	0,19	0	1,46	4,56	42,99	36,87
H <sub>2</sub>	2050	1.417,65	89,65	30,26	0	14,51	0,08	0,06	0,23	0,34	0,18	0	1,44	4,45	42,99	36,52
Late	alle Jahre	1.575,14	97,79	33,52	0	14,79	0,08	0,07	0,25	0,38	0,2	0	1,5	4,76	42,99	37,58
Supreme	2030	1.396,04	88,53	29,81	0	14,47	0,08	0,06	0,22	0,33	0,18	0	1,43	4,41	42,99	36,37
Supreme	2040	1.237,30	80,33	26,53	0	14,19	0,07	0,05	0,2	0,3	0,16	0	1,37	4,11	42,98	35,3
Supreme	2050	1.096,62	73,06	23,62	0	13,94	0,06	0,05	0,18	0,26	0,14	0	1,31	3,84	42,98	34,35

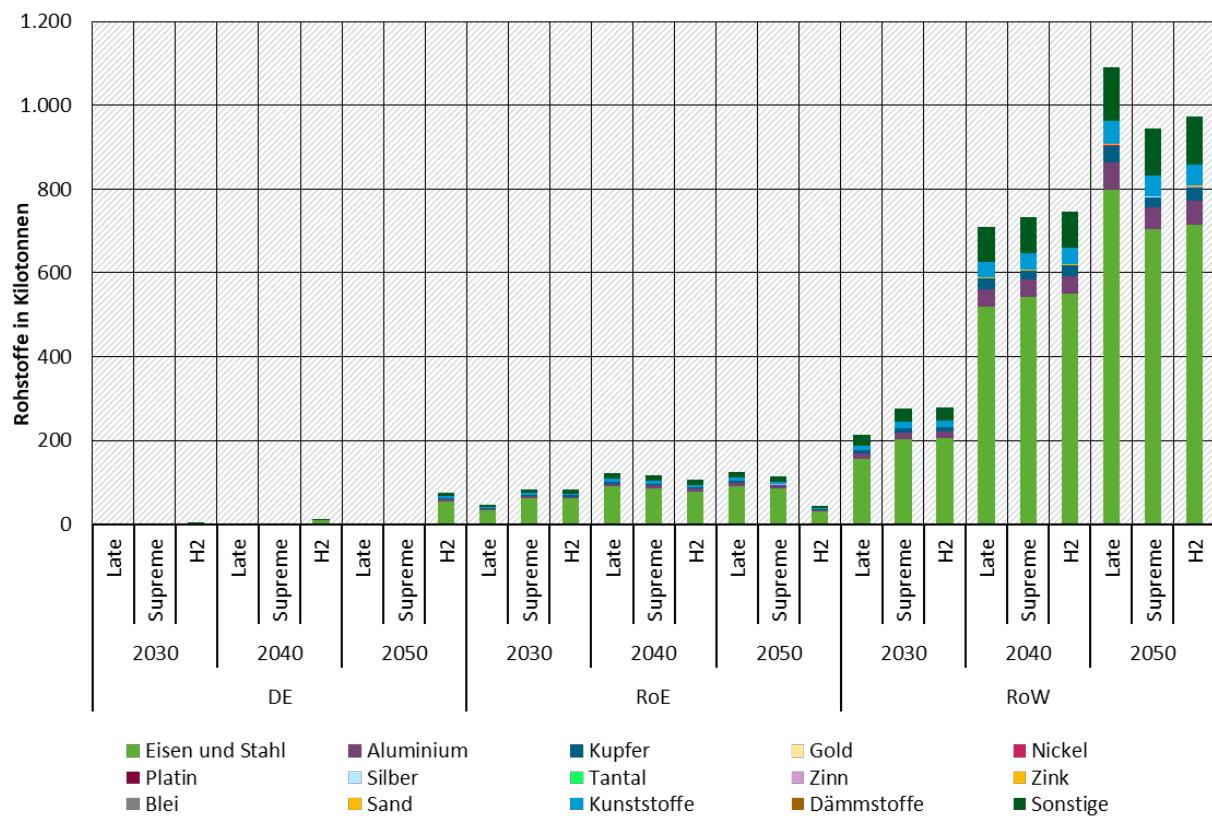
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.12.2 Rohstoffe je Szenario

Die absoluten Rohstoffbedarfe für die Nutzung von Brennstoffzellen ergeben sich aus der Verrechnung der spezifischen Rohstoffbedarfe je kWh erzeugtem Strom, für PEMFC bzw. SOFC, mit der im entsprechenden Jahr, Szenario und Region vorgegebenen absoluten Stromerzeugung (TWh/a) (siehe Tabelle 51 für PEMFC im Verkehr und Tabelle 52 für PEMFC und SOFC in der stationären Stromerzeugung, in Anhang A.11).

Abbildung 30 zeigt die absoluten Rohstoffbedarfe in Kilotonnen, die für die mobile Nutzung von PEMFC in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. In Deutschland kommen PEMFC im Verkehr nur im H<sub>2</sub>-Szenario zum Einsatz. Aufgrund der Spezialisierung dieses Szenarios auf die Nutzung von Wasserstoff-Technologien, steigt der Rohstoffbedarf bis 2050 auf ca. 75 kt und übersteigt damit den absoluten Rohstoffbedarf der Region EU ohne DE in diesem Szenario mit 43 kt deutlich. Da der spezifische Rohstoffbedarf in GreenLate über die Jahre konstant bleibt und hier gleichzeitig der höchste Bedarf an Strom aus Wasserstoffbrennstoffzellen vorherrscht, liegt der absolute Rohstoffbedarf in diesem Szenario im Jahr 2050 mit 126 kt (EU ohne EU) und 1.092 kt (Welt ohne EU) jeweils am höchsten.

**Abbildung 30: Rohstoffbedarfe für die Nutzung von PEMFC (für den Verkehr)**

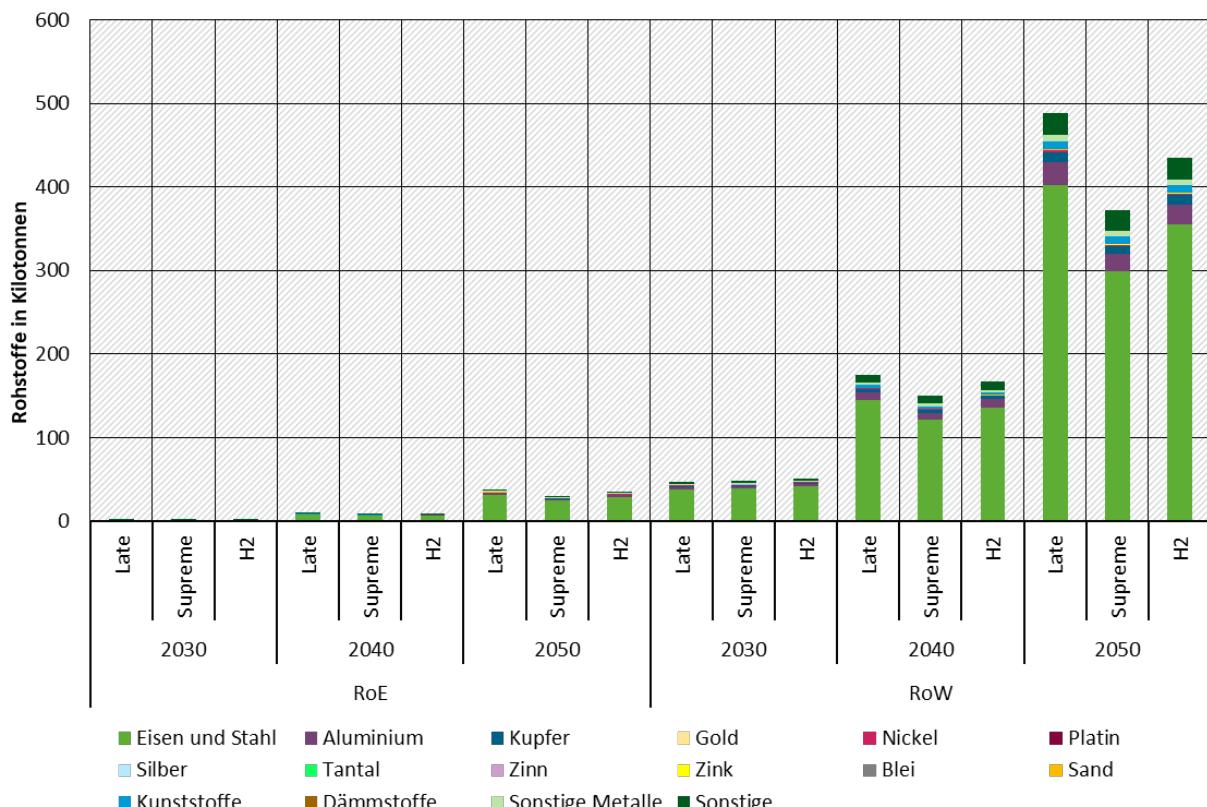


Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Abbildung 31 zeigt die absoluten Rohstoffbedarfe in Kilotonnen, die für die Nutzung von PEMFC und SOFC für die stationäre Stromerzeugung in EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. In der Region EU ohne DE wird pro Jahr in jedem Szenario die gleiche Strommenge durch Brennstoffzellen produziert. Der absolute Rohstoffbedarf innerhalb eines Jahres variiert daher zwischen den Szenarien nur auf Grund des unterschiedlichen spezifischen Rohstoffbedarfs. Daher ist der absolute Rohstoffbedarf für alle Jahre am höchsten in GreenLate und am niedrigsten in GreenSupreme. In der EU ohne DE steigt der Rohstoffbedarf im Jahr 2050

auf ca. 30 kt in GreenSupreme und ca. 38 kt in GreenLate. In der Welt ohne EU ist die produzierte Strommenge mit Brennstoffzellen in allen Jahren bei GreenSupreme und dem H<sub>2</sub>-Szenario identisch. Die produzierte Strommenge ist 2030 mit ca. 34 TWh in GreenLate am geringsten, steigt allerdings bis 2050 mit 351 TWh im Vergleich zu 334 TWh, in den anderen beiden Szenarien, am stärksten. Dem entsprechend liegt der absolute Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario 2050 mit rund 489 kt um einen Faktor von 10,5 höher als noch im Jahr 2030. Im GreenSupreme-Szenario werden im Jahr 2050 Rohstoffe in Höhe von 372 kt benötigt und im H<sub>2</sub>-Szenario liegt der absolute Rohstoffbedarf 2050 bei 435 kt.

**Abbildung 31: Rohstoffbedarfe für die Nutzung von SOFC/PEMFC (zur stationären Stromerzeugung)**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.13 Geothermie

In der Geothermie wird Erdwärme genutzt, um diese entweder direkt oder zur Stromerzeugung zu verwenden. Die Erdwärme wird zu einem Teil durch radioaktiven Zerfall im Erdkern erzeugt und stammt zum anderen Teil aus der Ursprungswärme von der Entstehung der Erde. Da der Erdkern nur sehr langsam abkühlt, ist die Geothermie in der anthropogenen zeitlichen Dimension eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle. Die Temperatur im Boden ist einerseits von der Tiefe und andererseits vom Ort abhängig. Mit steigender Tiefe nimmt die Temperatur zu. Durch Anomalien kommt es mancherorts zu deutlich überdurchschnittlichen Temperaturanstiegen, sodass dort das Ausnutzen von Geothermie besonders lohnenswert ist (Zahoransky et al. 2010).

Die Leistung von Geothermieanlagen ist sehr unterschiedlich und sowohl abhängig von Anlagengröße, geologischen Besonderheiten, als auch eingesetzter Technologie. Die typische Anlagenkapazität zur Stromerzeugung ist in (IRENA 2017) mit 0,1-110 MW entsprechend weit

angegeben. Zur Umrechnung der installierten Leistung in die Anzahl benötigter Anlagen, wird im Weiteren der Mittelwert dieser Angabe von 55 MW pro Anlage für Elektrizität- und Wärmeerzeugung genutzt. Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Anlagentypen zum Einsatz kommen. Stand 2022 sind in Deutschland knapp 70 % der Anlagen reine Heizwerke, 25 % sind Heizkraftwerke und ca. 5 % sind Kraftwerke (Bundesverband Geothermie 2022). Diese Verteilung wird für die Berechnung der Rohstoffbedarfe vereinfachend auf die anderen Regionen übertragen.

Es wurde eine durchschnittliche Anlagenlebensdauer von 30 Jahren unterstellt (Karlsdottir et al. 2020). Da angenommen wird, dass der aktuelle Bestand an Geothermieanlagen in allen Regionen überwiegend aus neueren Anlagen besteht, werden die Anlagen aus dem Bestand 2020 ab 2050 ersetzt. Für den Zubau im Stützjahr 2050 wird auch hier eine inkrementelle Verteilung über 10 Jahre bis 2060 vorgenommen (s. z. B. Kap. 6.4)

### 6.13.1 Rohstoffe in ST

Der in Tabelle 31 dargestellte Materialbedarf bezieht sich auf eine isländische Geothermieanlage, welche sowohl zur Erzeugung elektrischer Energie als auch zur direkten Wärmeerzeugung genutzt wird. Er wurde aus (Karlsdottir et al. 2020) für diese Anlage übernommen. Der abgebildete Materialbedarf enthält alle Rohstoffe, die in der Geothermieanlage verbaut sind, ausschließlich weiterer Ressourcen, die für den Betrieb benötigt werden, wie Energie und Wasser. Abfallprodukte werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Dieser Rohstoffbedarf wird im Folgenden als Referenz genommen. Er bleibt über alle Jahre, Szenarien und Regionen konstant. Die Anlage hat eine installierte Kapazität von 303 MW Strom- und 133 MW Wärmeerzeugung. Die geologischen Standortbedingungen können für Geothermie-Kraftwerke sehr unterschiedlich ausfallen. Die Ergebnisse dieses spezifischen Kraftwerks sind daher auf stark abweichende Geothermiekraftwerks-Standorte nur eingeschränkt übertragbar.

Der Materialbedarf der isländischen Referenzanlage besteht zu 53 % aus Stahl (davon ca. 2 % Edelstahl), zu 29 % aus Zement und zu 13 % aus Asphalt (Bitumen). In geringerem Maße werden auch Steinwolle und Aluminium, sowie geringe Mengen Kupfer und Kunststoffe verbaut.

**Tabelle 31: Rohstoffbedarf in kg für eine Geothermieanlage**

Szenario	Jahr	Zement	Stahl	Kupfer	Aluminium	Kunststoffe	Bitumen	Steinwolle
alle	alle	692.658	1.276.800	5.310	22.396	7.157	323.240	80.810

Quelle: (Karlsdottir et al. 2020)

### 6.13.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für Geothermieanlagen ergibt sich aus dem Zubau und Ersatz von Geothermieanlagen, die im jeweiligen Stützjahr, abhängig von Szenario und Region, gebaut werden (siehe Tabelle 53 in Anhang A.12).

Da rund 25 % der Anlagen sowohl Strom als auch Wärme produzieren, wurde dieser Anteil bei der Berechnung der Anzahl der Anlagen für alle Regionen abgezogen. Allein im H<sub>2</sub>-Szenario spielt Geothermie für die Stromerzeugung in Deutschland keine Rolle.

Insgesamt steigt die Zahl der Anlagen bis 2050 in Deutschland auf 37 im GreenLate-Szenario, 38 im H<sub>2</sub>-Szenario und 43 im GreenSupreme-Szenario. In der EU ohne DE wird gegenüber dem Bestand (2020) in allen drei Szenarien etwa das 8-9-fache an Anlagen bis 2050 benötigt. Im GreenSupreme-Szenario entspricht das z. B. 1.077 Anlagen im Jahr 2050. Für die Welt ohne EU

werden bis zum Jahr 2050 etwa zwischen 10.700 (GreenSupreme und H<sub>2</sub>-Szenario) und 11.700 (GreenLate) Anlagen benötigt. Über den gesamten Zeitraum betrachtet, müssten daher bis 2030 zwischen 1.600 (GreenLate) und 2.300 (GreenSupreme und H<sub>2</sub>-Szenario) Anlagen zugebaut werden. In der Dekade zwischen 2030 und 2040 müsste demgegenüber etwa das Doppelte bis Dreifache dieser Anlagenzahl zugebaut werden. Zwischen 2040 und 2050 werden zwischen 4.200 (GreenSupreme und H<sub>2</sub>-Szenario) und 5.200 (GreenLate) zusätzliche Geothermieanlagen benötigt.

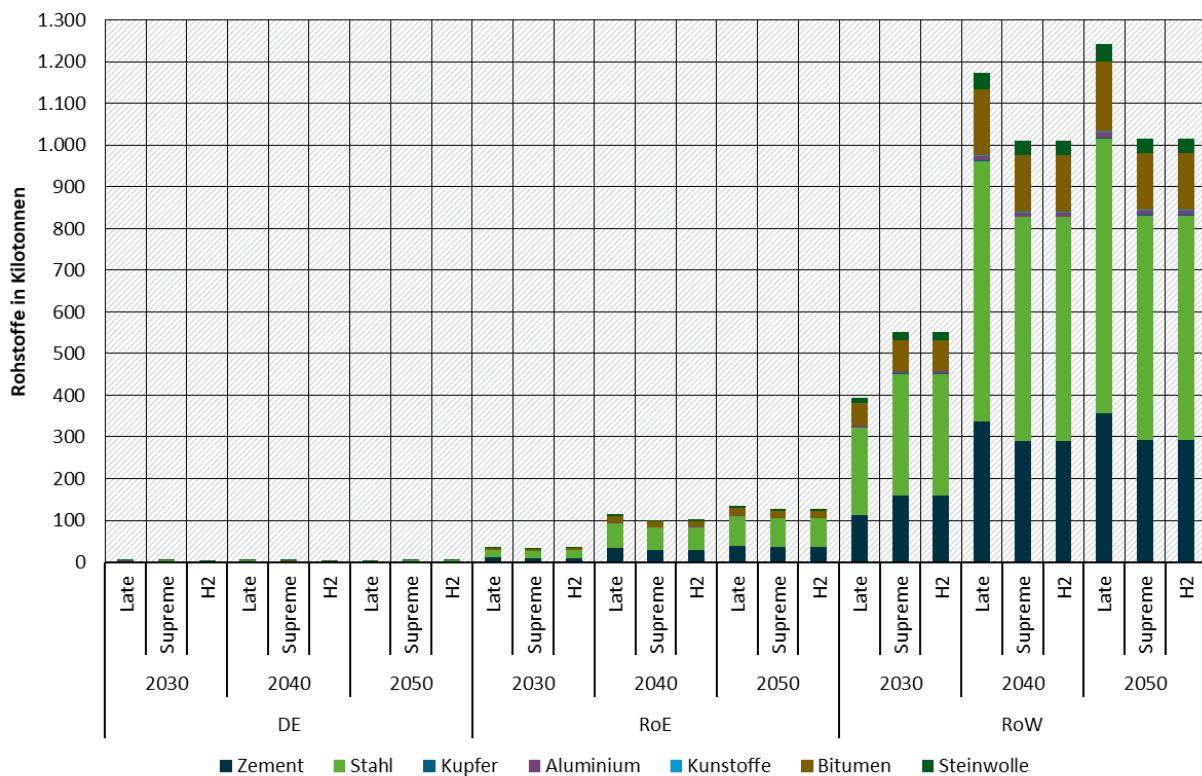
Abbildung 32 zeigt die Rohstoffbedarfe, die für Produktion von Geothermieanlagen und deren Zubau in Deutschland, der EU ohne DE und Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen.

Für Deutschland ist der Rohstoffbedarf 2030 im GreenSupreme-Szenario am höchsten (rd. 4 kt), 2040 in GreenLate (3,7 kt) und 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario (rd. 5 kt). Während der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario stetig ansteigt, geht er in GreenSupreme im Jahr 2040 zunächst zurück und steigt dann 2050 auf 3,5 kt, bei GreenLate erfolgt bis 2040 ein Anstieg und dann bis 2050 ein Rückgang auf rd. 2 kt.

Der Rohstoffbedarf der Geothermieanlagen in der EU ohne DE ist in allen drei Stützjahren im GreenLate-Szenario am höchsten. 2050 liegt der Bedarf um 6 % höher als im GreenSupreme-Szenario bzw. im H<sub>2</sub>-Szenario und erreicht damit rund 135 kt.

In der Welt ohne EU liegt der Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario im Jahr 2030 noch niedriger als in den beiden anderen Szenarien. Zwischen 2030 und 2050 steigt der Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario um das Dreifache und erreicht rund 1,3 Mio. t. Damit werden in diesem Szenario 2050 rund 22 % mehr Rohstoffe benötigt als im GreenSupreme- und im H<sub>2</sub>-Szenario.

**Abbildung 32: Rohstoffbedarf für Geothermieanlagen 2030 bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023) und (Karlsson et al. 2020)

## 6.14 Energiespeicher

Eine Form der Energiespeicher stellen Redox-Flow-Batterien (RFB) dar. Sie gehören zu den wiederaufladbaren elektrochemischen Energiespeichern, bei welchen reversible Reaktionen während des Lade- und Entladevorgangs genutzt werden, um elektrische Energie zu speichern.

RFB finden insbesondere als Großenergiespeicher Einsatz, da sie in diesem Bereich bezüglich Kosten, Sicherheit und Flexibilität anderen Energiespeichersystemen wie Lithium-Ionen-Batterien überlegen sein können. Sie bestehen, neben den Bauteilen für die Zelle (Elektroden, Elektrolyt und Separator), zusätzlich aus Tanks, Pumpen, Steuergeräten und dem Gestell. In Vanadium-RFB besteht der Elektrolyt aus Wasser, Schwefelsäure und Vanadium. Die Tanks können aus Kunststoff gefertigt werden. Für die Elektroden und den elektrischen Stromkreis wird Kupfer benötigt. Für die Pumpen inklusive des Motors zum Betreiben der Pumpen sowie für das Gestell, wird zu einem großen Teil Stahl eingesetzt (Chen et al. 2017).

Für die hier betrachtete Vanadium-RFB wird eine nominelle Kapazität von 8,3 MWh bzw. effektiv von 6 MWh angenommen. Sie hat eine Lebensdauer von 20 Jahren bei 409 Ladezyklen pro Jahr. Das bedeutet eine gespeicherte Gesamt-Strommenge von 49 GWh über die gesamte Lebenszeit. Eine Anpassung über die Zeit oder für unterschiedliche Regionen erfolgt nicht.

In den Szenarien GreenSupreme und H<sub>2</sub> werden für Deutschland keine Batteriespeicher angenommen (Dittrich et al. 2020c; Lux et al. 2021). Diese Annahme wurde für diese Szenarien auf die Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU übertragen. Vanadium-RFB finden daher ausschließlich im GreenLate-Szenario Anwendung.

### 6.14.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 32 zeigt den Rohstoffbedarf in Kilogramm für die Herstellung einer Vanadium-RFB. Der Rohstoffbedarf basiert auf dem Modul „Vanadium Redox Flow Battery (1 MW, 8.3 MWh, 6 Mwheff, 20a)“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Die Rohstoffbedarfe bleiben für alle Regionen und Jahre konstant, entsprechend den Anpassungen dieses Moduls für REFINE (s. Kap. 6.1). Ressourcen, wie Energie und Wasser, sowie Abfallprodukte werden hier nicht berücksichtigt.

Der Anteil des als kritisch eingestuften Rohstoffs Vanadium (European Commission 2023b) liegt bei 8 %. Des Weiteren sind geringere Mengen an Kunststoffen (6 %), Eisen und Stahl (3 %) und Kupfer (1 %) sowie weitere Metalle, darunter Blei, Gold, Silber, Zirkonium, Zinn, Zink und Tantal, enthalten. Unter den betrachteten Rohstoffen hat die Kategorie Sonstiges den größten Anteil mit rund 79 %. Hauptbestandteile sind Branntkalk (31 %) und Schwefelsäure (29 %).

**Tabelle 32: Rohstoffbedarf in kg für die Herstellung einer Vanadium-RFB im GreenLate-Szenario für alle Jahre**

Rohstoff	Bedarf [kg]
Vanadium	24.228
Aluminium	972,21
Eisen und Stahl	7.296
Kupfer	2.925
Sonstige Metalle	0,05
Blei	0,08

Rohstoff	Bedarf [kg]
Nickel	0,02
Tantal	0,03
Zinn	0,10
Kunststoffe	18.102
Zink	0,26
Sand	7.495
Sonstige	228.188

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

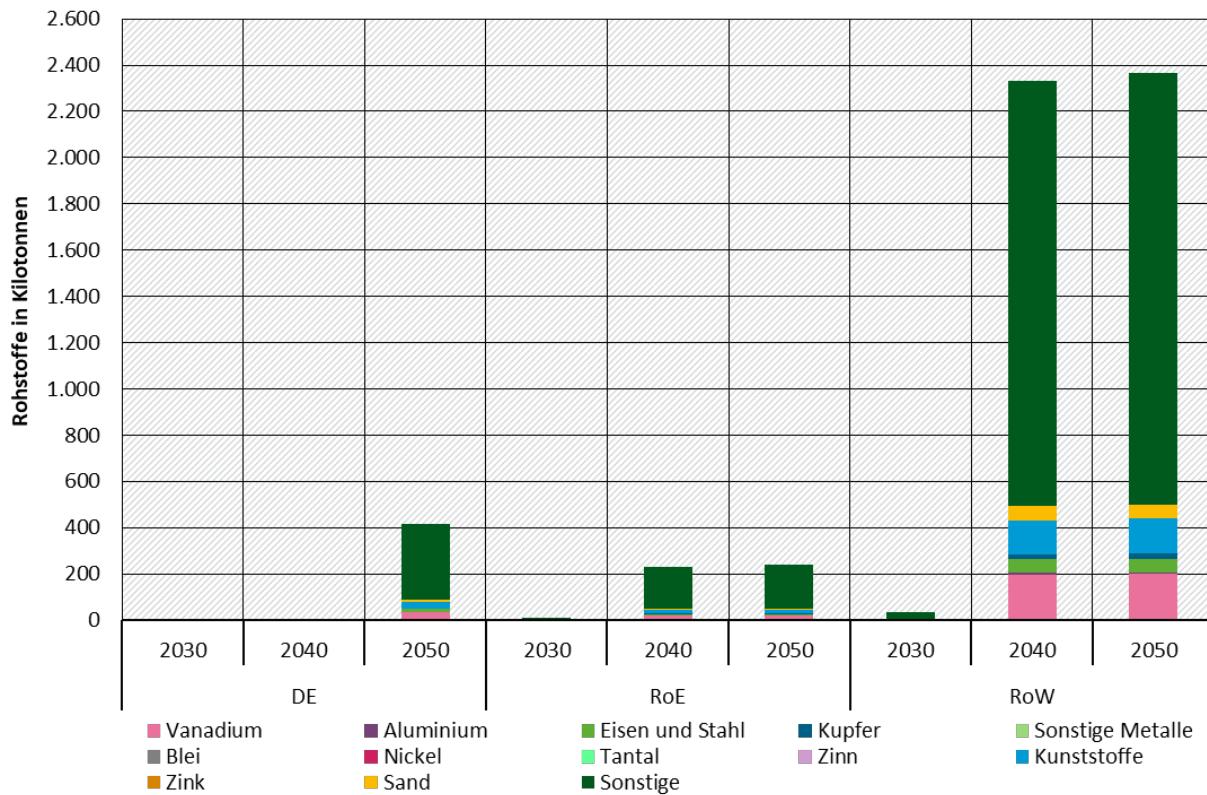
### 6.14.2 Rohstoffe je Szenario

In Deutschland ermöglichen die Einbindung in den europäischen Strommarkt und die Flexibilitätspotenziale der neuen Stromverbraucher sowie der thermischen Kraftwerke eine weitgehende Integration der fluktuierenden erneuerbaren Energien-Einspeisung, so dass erst 2050 neben PtG-Anlagen (also Elektrolyseure + Methanisierung) nur sehr geringe Leistungen an Batteriespeichern notwendig werden. So werden bis 2050 deutschlandweit mit einer installierten Leistung von 5,9 GW rund 5.900 Vanadium-RFB benötigt.

Die Herstellung bzw. der Ausbau von Batteriespeichern in der EU ohne DE und Welt ohne EU ist ebenfalls eng mit der Erzeugung erneuerbarer Energien verbunden. In der EU ohne DE werden bis 2050 etwa 700 Vanadium-RFB mehr benötigt als in DE. Weltweit ohne EU werden bis 2050 etwas mehr als 66.000 Vanadium-RFB mit einer Kapazität von rund 163.000 GWh pro Jahr benötigt.

Abbildung 33 zeigt den absoluten Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario zur Herstellung von Vanadium-RFB bis 2050 in allen drei Regionen. Der absolute Rohstoffbedarf ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs für die Herstellung einer Energiespeichereinheit mit dem benötigten Zubau und Ersatz im jeweiligen Stützjahr und Region (siehe Tabelle 54 in Anhang A.13). Für Deutschland steigt der Rohstoffbedarf auf rund 417 kt. In der EU ohne DE liegt der Rohstoffbedarf 2030 bei knapp über 9 kt und steigt auf rund 230 kt im Jahr 2040; er verbleibt im Jahr 2050 auf ähnlichem Niveau und steigt auf rund 238 kt an. In der Welt ohne EU steigt der Rohstoffbedarf zwischen 2030 und 2040 um Faktor 70 an und verbleibt im Jahr 2050 auf ähnlichem Niveau (ca. 2,4 Mio. t).

**Abbildung 33: Rohstoffbedarf für die Produktion von Energiespeichern im GreenLate-Szenario**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

## 6.15 CO<sub>2</sub>-Bereitstellung

Für die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> gibt es verschiedene Konzepte, die sich in Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Quelle und die Abscheidetechnik unterscheiden. Als CO<sub>2</sub>-Quelle können Industrieprozesse bzw. fossile Kraftwerke, sogenannte Punktquellen, oder das CO<sub>2</sub> der Atmosphäre dienen. Letzteres wird als Abscheidung aus der Luft bzw. Direct Air Capture (DAC) bezeichnet. Aufgrund der wesentlich geringeren Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Luft im Vergleich zu Abgasen aus Punktquellen ist DAC deutlich energieintensiver (Budinis 2022).

Für die Abscheidung aus der Luft ist die Druckwechseladsorption eines der am weitesten entwickelten Verfahren. Bei der Druckwechseladsorption handelt es sich um ein Verfahren, bei welchem sich Gasbestandteile, wie CO<sub>2</sub>, unter Druck an die Oberfläche eines Feststoffes (Adsorbent) anlagern. Im Vergleich zu anderen absorptiven Verfahren, handelt es sich daher hierbei um ein adsorptives Abscheideverfahren (Liebich et al. 2020). Die anschließende Desorption des CO<sub>2</sub> läuft bei verminderterem Druck und einer Temperatur von ca. 100°C. Einige Demonstrationsanlagen, sowie erste kommerziellen DAC-Anlagen, auf Basis des Druckwechseladsorptionsverfahrens sind bereits in Nutzung (Wurzbacher 2017).

In den Green-Szenarien wurde allgemein unterstellt, dass CO<sub>2</sub> innerhalb von Deutschland über industrielle Punktquellen und in den Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU über den DAC-Prozess bereitgestellt wird (Dittrich et al. 2020b). Diese Annahme wurde ebenfalls auf das H<sub>2</sub>-Szenario übertragen.

### 6.15.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 33 zeigt den spezifischen Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von einer Tonne CO<sub>2</sub> durch das DAC-Verfahren. Der Rohstoffbedarf basiert auf dem Modul „carbon dioxide, DAC process“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)) und beinhaltet alle verbauten Rohstoffe der DAC-Anlage (Liebich et al. 2023). Energie, Wasser und Abfallprodukte werden hier nicht berücksichtigt. Der angenommene Rohstoffbedarf ist konstant über alle Regionen, Szenarien und Jahre. Den größten Anteil am Rohstoffbedarf bedingen Sand und Kies mit 53 %. Beton für das Fundament nimmt 13 % ein. Stahl macht insgesamt etwa 16 %, Aluminium etwa 6 % des Rohstoffbedarfs aus. Kupfer, Dämm- und Kunststoffe werden in geringem Maße ebenfalls benötigt. Die Kategorie Sonstige (rd. 8 %) umfasst verschiedene Chemikalien.

**Tabelle 33: Rohstoffbedarf in g für die Bereitstellung von 1 t DAC-CO<sub>2</sub>**

Szenario / Jahre	Stahl	Kupfer	Aluminium	Dämmstoff	Kunststoff	Sand und Kies	Beton	Sonstige
alle	6.710	71,50	2.630	584,00	1.592	22.800	5.439	3.389

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

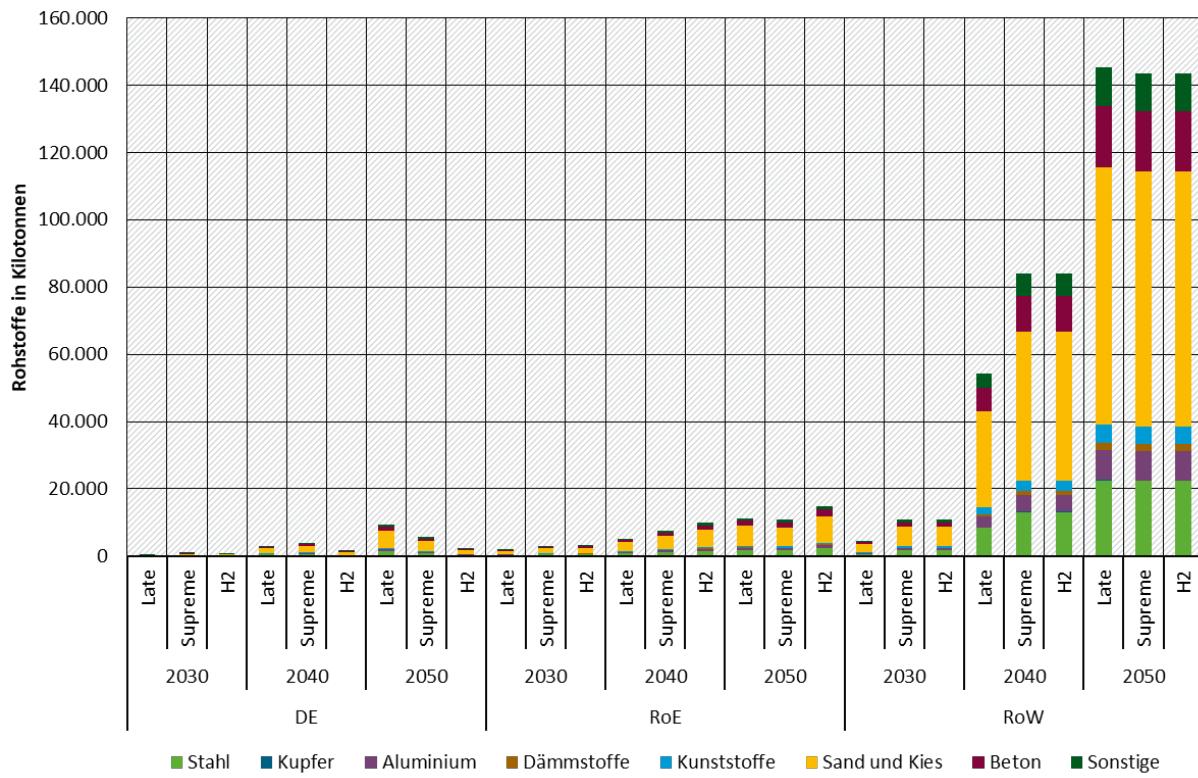
### 6.15.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Tonne DAC-CO<sub>2</sub> mit den entsprechend benötigten CO<sub>2</sub>-Mengen im jeweiligen Szenario, Jahr und Region (siehe Tabelle 55 in Anhang A.14).

Für die Bereitstellung von DAC-CO<sub>2</sub> werden unterschiedliche Auswertungsperspektiven präsentiert. Zunächst sind die Rohstoffbedarfe nach den in den Regionen tatsächlichen anfallenden Verbräuchen dargestellt und zusätzlich die Rohstoffbedarfe differenziert nach den eigentlichen Produktionsorten.

Abbildung 34 zeigt die absoluten Rohstoffbedarfe, die für die Bereitstellung von DAC-CO<sub>2</sub> anfallen, aufgeteilt auf den Nutzungsort von PtX-Produkten, zu deren Herstellung das DAC-CO<sub>2</sub> eingesetzt wurde. Auffällig ist der hohe Rohstoffbedarf für Deutschland im GreenLate-Szenario im Jahr 2050. Dieser liegt mit 9,4 Mio. t nahe an den Rohstoffaufwendungen in der EU ohne DE im gleichen Jahr und Szenario mit knapp 10 Mio. t. In allen drei Regionen und Szenarien nehmen die Rohstoffbedarfe über die Stützjahre kontinuierlich zu.

**Abbildung 34: Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von DAC-CO<sub>2</sub>, nach Nutzungsort**



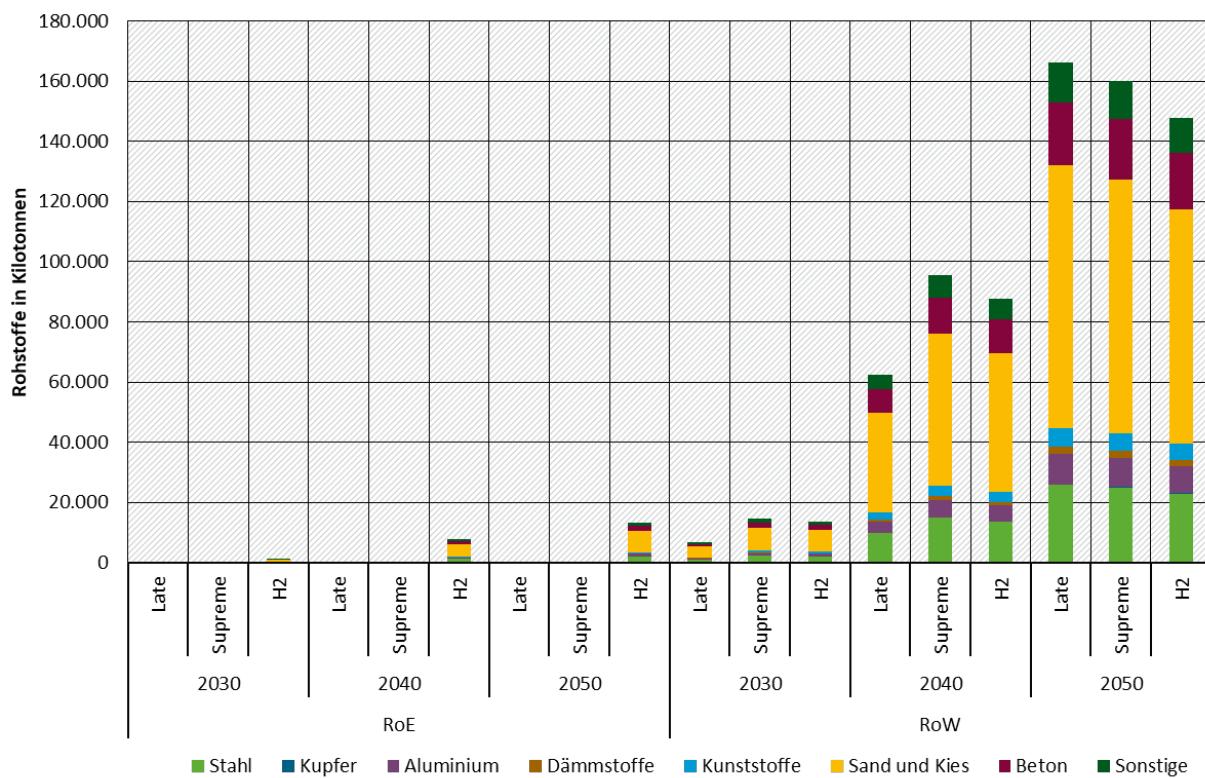
Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Abbildung 35 zeigt schließlich die Rohstoffbedarfe, die an den jeweiligen Produktionsorten für die Bereitstellung von CO<sub>2</sub> durch DAC-Verfahren in der EU ohne DE und in der Welt ohne EU zwischen 2030 und 2050 anfallen. Die Ergebnisse beinhalten die Eigenproduktion sowie die Exporte für den Bedarf in anderen Regionen. Berücksichtigt wurde ein steigender CO<sub>2</sub>-Bedarf in den jeweiligen Regionen, der sich am Bedarf für PtX-Technologien (Methanisierung (Kap. 6.8), Methanolsynthese (Kap. 6.9) und FT-Kraftstoffe (Kap. 6.10)) orientiert.

Innerhalb der EU ohne DE steigt der CO<sub>2</sub>-Bedarf bis 2050 auf rund 306 Mio. t im H<sub>2</sub>-Szenario. In den anderen Szenarien wird kein Bedarf für die EU ohne DE angenommen, da Methanol und FT-Kraftstoffe komplett aus der Welt ohne EU importiert werden (PtG-Methan wird in dieser Region nicht eingesetzt, siehe Kapitel 6.8).

Für die Welt ohne EU steigt der CO<sub>2</sub>-Bedarf bis 2050 auf über 3,4 Mrd. t im H<sub>2</sub>-Szenario, rund 3,8 Mrd. t im GreenLate-Szenario und rund 3,7 Mrd. t im GreenSupreme-Szenario. Durch den verzögerten Anstieg bzw. die Realisierung des Ambitionsniveaus im GreenLate-Szenario, steigt der Bedarf an CO<sub>2</sub> erst relativ spät in der Welt ohne EU und führt am Ende der ersten Jahrhunderthälfte zu einem knapp 25-mal höheren CO<sub>2</sub>-Bedarf im Vergleich zu 2030. Im Jahr 2030 hat das GreenLate-Szenario den niedrigsten CO<sub>2</sub>-Bedarf für die Welt ohne EU, während es im Jahr 2050 den höchsten Bedarf hat. 2030 liegt der CO<sub>2</sub>-Bedarf im GreenSupreme-Szenario 54 % höher, 2040 etwa 35 % höher und 2050 4 % unter dem GreenLate-Szenario.

**Abbildung 35: Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von DAC-CO<sub>2</sub>, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Dementsprechend liegt der Rohstoffbedarf in der Welt ohne EU in den beiden ersten Stützjahren im GreenSupreme-Szenario um 118 % (2030) und 53 % (2040) höher als im GreenLate-Szenario. Im Jahr 2050 liegen dagegen die Rohstoffbedarfe im GreenLate-Szenario rund 4 % höher als im GreenSupreme-Szenario (im Vergleich zum H<sub>2</sub>-Szenario liegt er um 12 % höher). Insgesamt werden im Jahr 2050 im GreenLate-Szenario in der Welt ohne EU 166 Mio. t, im GreenSupreme-Szenario 160 Mio. t und im H<sub>2</sub>-Szenario knapp 148 Mio. t Rohstoffe benötigt.

In der EU ohne DE steigt der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario im Jahr 2050 um das 11,6-fache im Vergleich zum Jahr 2030. Insgesamt liegt der Rohstoffbedarf im Jahr 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario bei 13,2 Mio. t.

## 6.16 Meerwasserentsalzungsanlagen

Meerwasserentsalzungsanlagen ermöglichen das Gewinnen von Trink- und Betriebswasser aus (salzhaltigem) Meerwasser. Die Entsalzung von Meerwasser bietet daher die Möglichkeit, Wasserknappheit zu mildern, weshalb diese Anlagen vorwiegend im Nahen Osten und Nordafrika, aber auch z. B. in Australien und Indien zum Einsatz kommen (IDA 2020; Jones et al. 2019). Meerwasserentsalzungsanlagen sind für die Elektrolyse von zentraler Bedeutung, da sie aufbereitetes deionisiertes Wasser zur Verfügung stellen.

Nach Angaben der International Desalination Association (IDA 2020) gab es 2019 weltweit etwa eine Produktionskapazität von rund 107 Mio. Kubikmeter pro Tag, verteilt auf ca. 17.000 Meerwasserentsalzungsanlagen im großtechnischen Maßstab (Marscheider-Weidemann et al. 2021). Das industriell ausgereifte Verfahren wird zu 61 % für Seewasser, zu 21 % für Brackwasser zu 8 % für Flusswasser und zu ca. 6 % für Abwasser eingesetzt. Zusätzlich besteht ca. 4 % des eingesetzten Wassers aus Rohwasser, welches für industrielle Zwecke eingestzt

wird, bei denen eine hohe Wasserqualität erforderlich ist (Jones et al. 2019; Marscheider-Weidemann et al. 2021).

Unterschieden werden thermische Verfahren wie das MSF-Verfahren (multi-stage-flash, Blitzverdampfung) und Membranverfahren, wie die Umkehrosmose. Heute arbeitet der Großteil (ca. 70 %) aller Meerwasserentsalzungsanlagen mit Umkehrosmose. Im Vergleich zu thermischen Verfahren, zeichnet sich die Umkehrosmose durch niedrigere Investitionskosten, Energiebedarfe und Umweltauswirkungen aus (Jones et al. 2019; Marscheider-Weidemann et al. 2021).

In diesem Projekt wird von der Umkehrosmose und anschließender Aufbereitung ausgegangen. Bei diesem Verfahren wird Wasser mit Hilfe einer Pumpe durch eine semipermeable Membran gepresst, die Ionen der gelösten Stoffe werden zurückgehalten. Der Druck muss über dem natürlichen osmotischen Druck des Wassers liegen. Hochdruckpumpen können Druck zwischen 5,4 und 8,2 MPa (54-82 bar) erzeugen. Die Ausbeute von entsalztem Wasser liegt zwischen 30 % und 45 % (Römpf 2020).

### 6.16.1 Rohstoffe in ST

Tabelle 34 zeigt den Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von einer Tonne Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen. Der Rohstoffbedarf basiert auf dem fModul „water, deionised\_market for water, deionised“ des für REFINE generierten Ökobilanzmodells (siehe Kap. 6.1 bzw. (Dittrich et al. 2024b)). Das Modul beinhaltet alle verbauten Rohstoffe der Meerwasserentsalzungsanlage. Der Rohstoffbedarf ist einheitlich für alle Regionen, Szenarien und Jahren angenommen. Den größten Anteil am Rohstoffbedarf hat Beton mit rd. 36 %. Eisen und Stahl machen 35 % des Bedarfs aus, Sand 13 % und Kunststoffe 0,1 %. Unter „Sonstige“ ist hier Kalkhydrat gefasst, dessen Anteil am Rohstoffbedarf bei rund 16 % liegt.

**Tabelle 34: Rohstoffbedarf in g für die Bereitstellung von 1 t Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen**

Szenario	Jahr	Eisen und Stahl	Sand	Kunststoff	Beton	Sonstige
alle	alle	5,94	2,17	0,01	6,10	2,62

Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

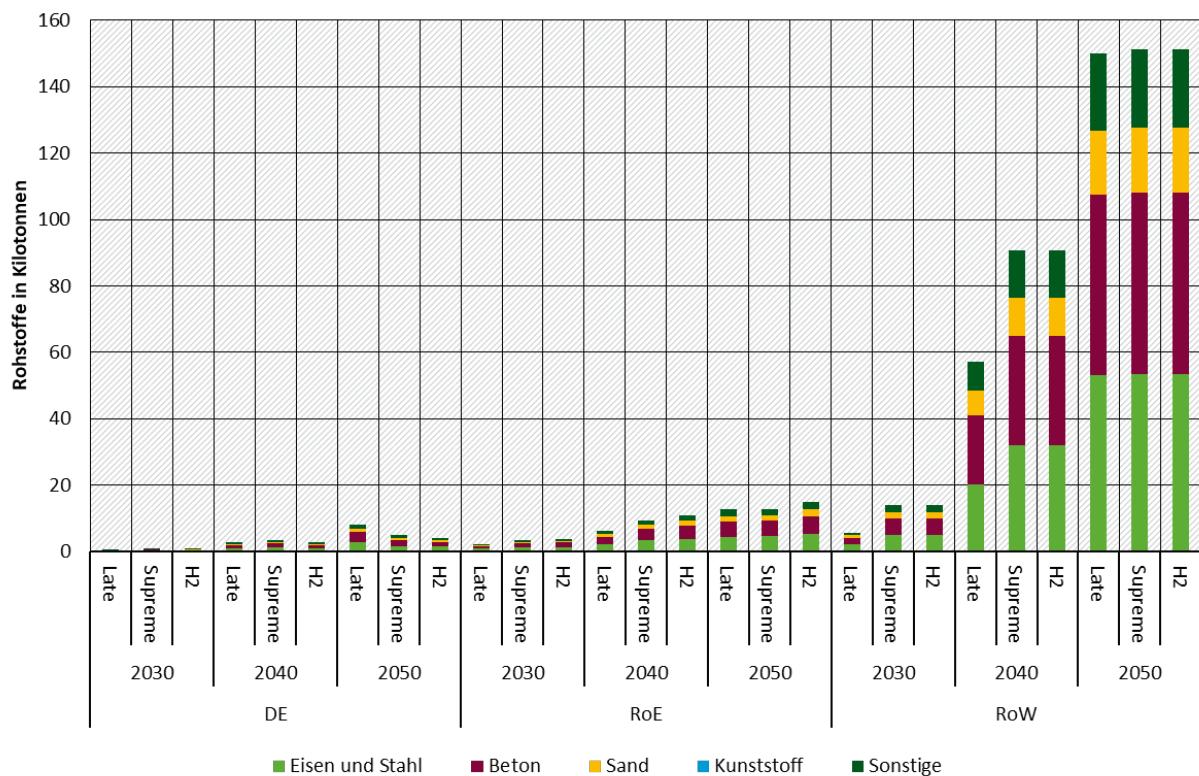
### 6.16.2 Rohstoffe je Szenario

Der absolute Rohstoffbedarf für Meerwasserentsalzungsanlagen ergibt sich aus der Verrechnung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Tonne aufbereitetem Wasser mit den entsprechend benötigten Wassermengen im jeweiligen Szenario, Jahr und Region (siehe Tabelle 56 in Anhang A.15).

Abbildung 36 zeigt die absoluten Rohstoffbedarfe für Meerwasserentsalzungsanlagen nach Nutzungsort. Der Rohstoffbedarf ist dabei den Regionen zugeordnet, in denen PtX-Produkte genutzt werden, für deren Herstellung Wasser aus Meerwasserentsalzung verwendet wird.

Für Deutschland liegt der Rohstoffbedarf im Jahr 2050 danach bei 4 (H<sub>2</sub>-Szenario) bis 8 kt (GreenLate), und in GreenLate damit um das 40-fache höher als im Jahr 2030. Für die Region EU ohne DE (RoE) errechnet sich ein Rohstoffbedarf im Jahr 2050 von rund 13 kt (GreenLate) bis knapp 15 kt (H<sub>2</sub>-Szenario). Für die Welt ohne EU (RoW) liegt der Rohstoffbedarf in allen drei Szenarien im Jahr 2050 auf ähnlichem Niveau, im GreenLate-Szenario bei 150 kt und im GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenario bei rund 151 kt.

**Abbildung 36: Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen, nach Nutzungsziel**



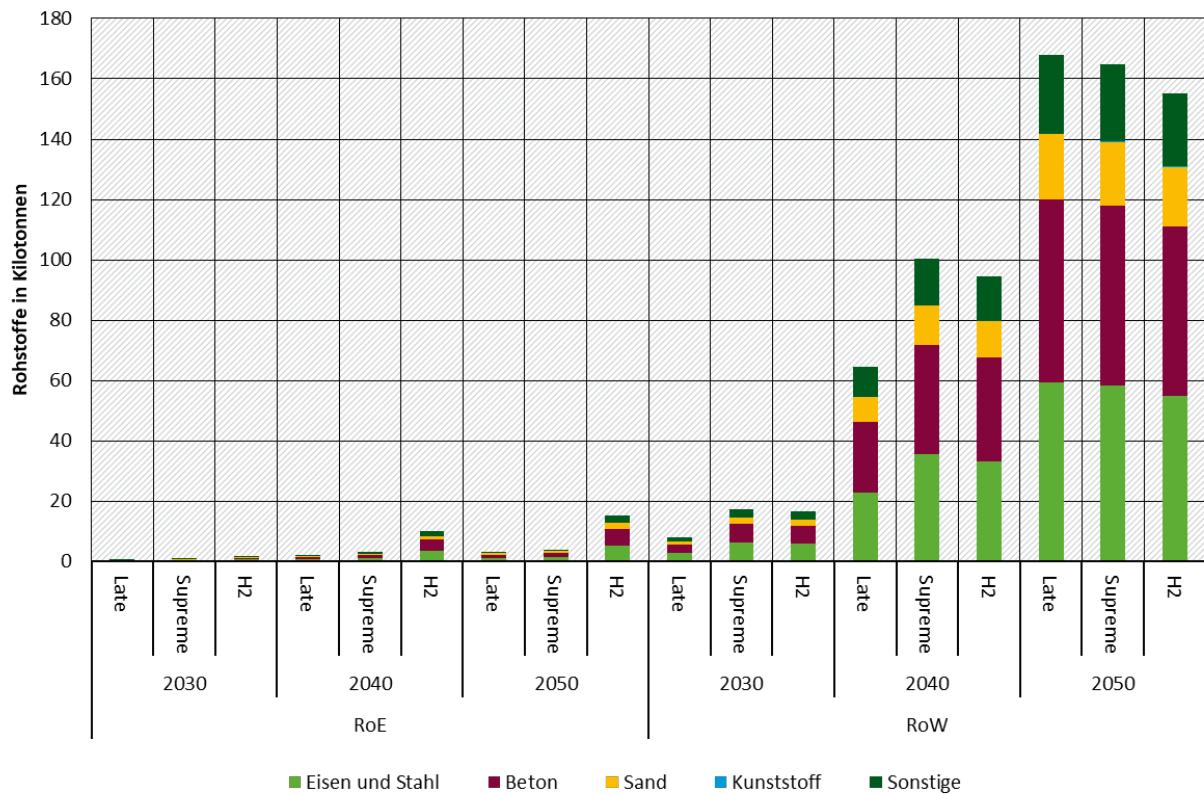
Quelle: eigene Darstellung, ifeu/coinvent, (Liebich et al. 2023)

In Abgrenzung zu Abbildung 36 zeigt Abbildung 37 die absoluten Rohstoffbedarfe an den jeweiligen Produktionsorten, die für die Bereitstellung von Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen (MEA) anfallen. Da in Deutschland keine MEA vorgesehen sind, beschränken sich die Produktionsregionen auf die EU ohne DE und die Welt ohne EU. Berücksichtigt wurde ein steigender Wasserbedarf in den Regionen, der sich am Bedarf für PtX-Technologien orientiert. Der Wasserbedarf für die Elektrolyse (H<sub>2</sub>-Endprodukt und H<sub>2</sub>-Zwischenprodukt) ist dabei am größten, aber auch Bedarfe für die Methanolsynthese (Kap. 6.9) und FT-Kraftstoffe (Kap. 6.10) steigen. Es handelt sich dabei um eine konservative Schätzung der Rohstoffbedarfe.

Innerhalb der EU ohne DE steigt der Wasserbedarf bis 2050 auf rund 187 Mio. t im GreenLate-Szenario, auf rund 235 Mio. t im GreenSupreme-Szenario und auf über 894 Mio. t im H<sub>2</sub>-Szenario. Ausschlaggebend für den hohen Wasserbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario ist der angenommene zusätzlich Wasserbedarf zur Deckung von PtX-Exporten nach Deutschland ab dem Jahr 2040. In den anderen Szenarien ist kein Export von der EU ohne DE nach Deutschland angenommen.

Für die Welt ohne EU steigt der Wasserbedarf bis 2050 auf rund 9,2 Mrd. t im H<sub>2</sub>-Szenario und liegt im GreenSupreme-Szenario sowie im GreenLate-Szenario nur knapp unter 10 Mrd. t. Auch hier steigt der Wasserbedarf auf Grund der steigenden Bedarfe für die Elektrolyse-Technologien in der Region und den PtX-Exporten in die beiden anderen Regionen, EU ohne DE und Deutschland.

**Abbildung 37: Rohstoffbedarf für die Bereitstellung von Wasser durch Meerwasserentsalzungsanlagen, nach Produktionsort**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Im GreenLate-Szenario besteht in beiden Regionen in beinahe allen Jahren der niedrigste Rohstoffbedarf für MEA zur Bereitstellung von Wasser. Ausnahme ist das Jahr 2050 in der Region Welt ohne EU, hier zeigt das H<sub>2</sub>-Szenario den niedrigsten Rohstoffbedarf und GreenLate den höchsten. Grund dafür sind die deutlich steigenden Eigenbedarfe im GreenLate-Szenario im Jahr 2050 gegenüber 2040 sowie auch steigende Exporte in die Region EU ohne DE und Deutschland.

Dementsprechend ist der Rohstoffbedarf in der EU ohne DE im GreenLate-Szenario vor allem in den beiden Stützjahren 2030 und 2040 niedriger als in den beiden anderen Szenarien. Im H<sub>2</sub>-Szenario liegt er im Jahr 2050 mit 15 kt deutlich am höchsten.

Für die Welt ohne EU ist der Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario ebenso für die beiden Stützjahre 2030 und 2040 am niedrigsten, während er im GreenSupreme-Szenario am höchsten ist. Im Jahr 2050 liegt der Rohstoffbedarf allerdings im H<sub>2</sub>-Szenario mit 155 kt am niedrigsten, während er im GreenSupreme-Szenario rund 165 kt und im GreenLate-Szenario rund 168 kt beträgt. Grund für diese Verschiebung ist die Produktion von PtL-Methanol, welches in den Green-Szenarien für alle Regionen in der Welt ohne EU produziert und exportiert wird, im H<sub>2</sub>-Szenario allerdings in allen Regionen heimisch produziert wird.

## 6.17 Zusammenfassung und Zwischenfazit

### 6.17.1 Gesamtrohstoffnachfrage für alle (betrachteten) Schlüsseltechnologien in Szenarien und Jahren und Regionen

In Abbildung 38 und Abbildung 39 ist der weltweite Rohstoffbedarf (aller Regionen) für alle betrachteten Schlüsseltechnologien für die Szenarien und Jahre abgebildet. Die Mengen ergeben sich durch Aufsummieren der in den einzelnen Technologiekapiteln 6.2 bis 6.16 abgeleiteten Rohstoffbedarfe.

Abbildung 38 zeigt den weltweiten Rohstoffbedarf in den jeweiligen Stützjahren und Szenarien differenziert nach den Schlüsseltechnologien. Es handelt sich dabei um Rohstoffbedarfe, die durch den Bau bzw. die Produktion der Schlüsseltechnologien in der jeweiligen Region anfallen. PtX-Exporte werden demnach in dieser Betrachtung der Region zugerechnet, in der sie produziert werden. Im Jahr 2030 variiert der weltweite Rohstoffbedarf je nach Szenario zwischen 252 Mio. t (GreenLate) und 358 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario). Der Rohstoffbedarf liegt zehn Jahre später im Jahr 2040 etwa um den Faktor 2,2-2,5 über dem Bedarf im Jahr 2030 und ist im H<sub>2</sub>-Szenario mit 791 Mio. t am höchsten. Der Rohstoffbedarf im GreenLate-Szenario liegt 2040 bei 633 Mio. t und im GreenSupreme-Szenario bei 687 Mio. t. Im Jahr 2050 ist im GreenLate- und H<sub>2</sub>-Szenario ein deutlicher Anstieg zu erkennen: 1.058 Mio. t bzw. 1.084 Mio. t Rohstoffe werden für die Schlüsseltechnologien benötigt. Im GreenSupreme-Szenario werden im Jahr 2050 hingegen rund 907 Mio. t Rohstoffe nachgefragt.

Der Rohstoffbedarf ist somit im H<sub>2</sub>-Szenario in allen Stützjahren am höchsten. Während der Rohstoffbedarf etwa für die Elektrolyse im H<sub>2</sub>-Szenario nur leicht über dem der anderen Szenarien liegt, fallen die Rohstoffbedarfe für Onshore-WEA und PV-Dachanlagen am stärksten ins Gewicht. Für Onshore-WEA liegt der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario ca. 19 % (6 %) über dem des GreenSupreme-Szenarios (GreenLate-Szenarios), für PV-Dach liegt das H<sub>2</sub>-Szenario sogar 65 % (25 %) über GreenSupreme (GreenLate). Für Onshore-WEA ist dies vor allem auf die spezifischen Bedarfe zurückzuführen (siehe Kapitel 6.3.1): Während die erzeugte Strommenge in 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario nur leicht über der in GreenSupreme und unter der in GreenLate liegt, hat das H<sub>2</sub>-Szenario einen deutlich höheren spezifischen Rohstoffbedarf je erzeugter kWh Strom für Eisen und Stahl, Sand und Kies, sowie Beton. Dies ist zurückzuführen auf die unterschiedlichen Annahmen in den Eingangsdaten der Schlüsseltechnologien, die im Detail in (Dittrich et al. 2024b) beschrieben sind: Im H<sub>2</sub>- und GreenSupreme-Szenario werden im Vergleich zu GreenLate größere Onshore-WEA angenommen, mit höherer Leistung, größerem Rotordurchmesser und Nabenhöhe, wodurch ebenfalls ein größeres Fundament benötigt wird. Dadurch entstehen im H<sub>2</sub>- und GreenSupreme-Szenario verglichen mit GreenLate höhere Rohstoffbedarfe pro Anlage und erzeuter Kilowattstunde Strom, welche sich auf unterschiedliche angenommene Anlagenlebensdauern verteilen: 25 Jahre in GreenSupreme und jeweils 20 Jahre im H<sub>2</sub>-Szenario.

Ähnliches ist auch für PV-Dachanlagen zu beobachten: Während die Stromerzeugung in 2050 im H<sub>2</sub>- und GreenSupreme Szenario etwa auf gleicher Höhe und deutlich über der Stromerzeugung in GreenLate liegen, sind die jährlichen zugebauten Anlagen in GreenLate ca. doppelt und im H<sub>2</sub>-Szenario fast dreifach so hoch wie im GreenSupreme-Szenario. Grund hierfür ist die unterschiedliche angenommene Anlagenlebensdauer von 30 Jahren in GreenSupreme, 25 Jahren in GreenLate und 20 Jahren in H<sub>2</sub>.

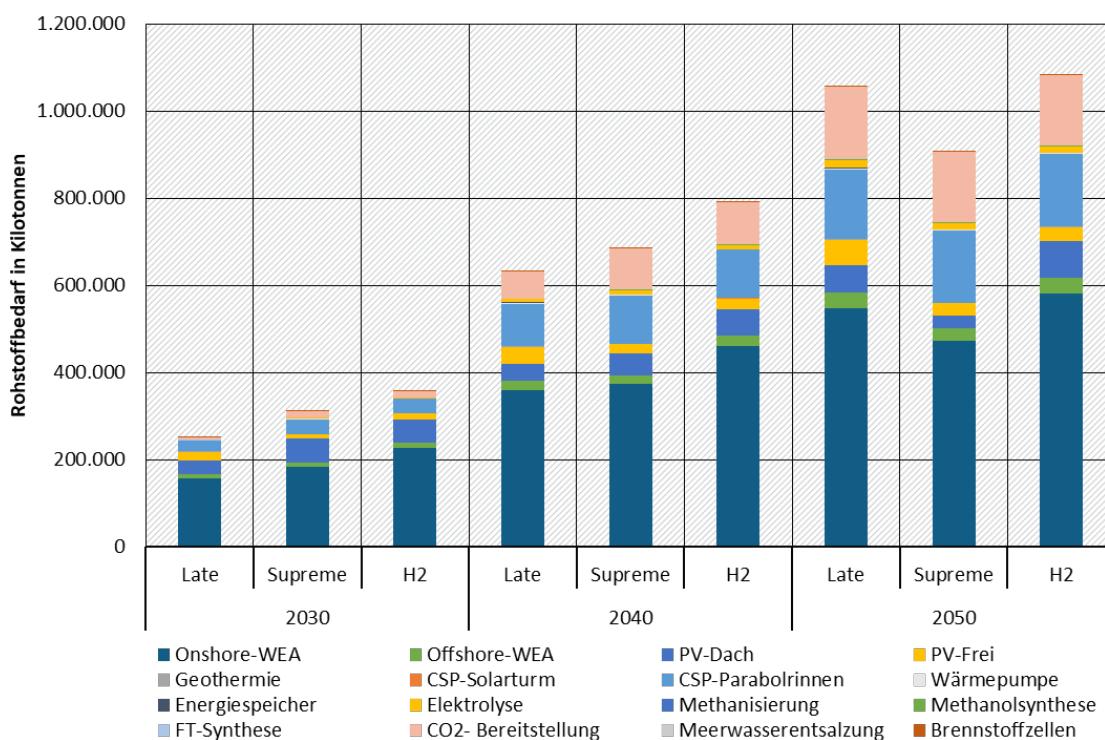
Das Beispiel der Onshore-WEA und PV-Dachanlagen verdeutlicht, dass neben den aus den Szenarien entnommenen Kapazitäten, auch die verschiedenen Annahmen in den Eingangsdaten des Ökobilanzmodells einen starken Einfluss auf die resultierenden Rohstoffbedarfe haben.

Eine Auswertung nach Regionen wurde ebenfalls vorgenommen. Danach fällt der wesentliche Rohstoffbedarf erwartungsgemäß auf die Welt ohne EU; je nach Szenario und Jahr fallen 89-94 % des Rohstoffbedarfs auf diese Region.

Die Region EU ohne DE beansprucht 4-9 % des weltweiten Rohstoffbedarfs. Im Jahr 2030 liegt der Bedarf zwischen 22 Mio. t (GreenLate) und 33 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario), im Jahr 2040 zwischen 41 Mio. t (GreenLate) und 68 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario) und im Jahr 2050 zwischen 44 Mio. t (GreenSupreme) und 85 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario).

Deutschlands Rohstoffbedarf umfasst 1-2 % der globalen Menge. 2030 liegen die Bedarfe der drei Szenarien noch recht nahe beieinander: 6,1 Mio. t (GreenLate), 6,8 Mio. t (GreenSupreme) und 6,8 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario). Im Jahr 2040 liegt der deutsche Rohstoffbedarf zwischen 7,7 Mio. t (GreenLate) und 13,4 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario). Ein weiterer Anstieg im Jahr 2050 bedeutet einen Bedarf zwischen rund 10 Mio. t (GreenSupreme) und 17,5 Mio. t (H<sub>2</sub>-Szenario).

**Abbildung 38: Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In allen Jahren, Regionen und Szenarien nimmt der Zubau der Onshore-WEA den größten Rohstoffbedarf ein. Besonders im Jahr 2030 ist der Anteil der Onshore-WEA mit 64 % im H<sub>2</sub>-Szenario, 62 % im GreenLate-Szenario und 59 % im GreenSupreme-Szenario besonders hoch. Im Jahr 2050 nimmt die Schlüsseltechnologie zwar weiterhin den größten Anteil ein, jedoch liegt der Anteil anderer Schlüsseltechnologien dann etwas höher. Im GreenSupreme-Szenario umfasst der Materialaufwand für Onshore-WEA 2050 etwa 472 Mio. t und nimmt damit noch etwa 52 % des Gesamtrohstoffbedarfs ein. Im H<sub>2</sub>-Szenario sind es rund 582 Mio. t, der Anteil am Gesamtrohstoffbedarf liegt bei 54 %.

Die Bedeutung der Offshore-WEA ist im Vergleich zu den Onshore-WEA gering und nimmt über die Jahre und Szenarien 3-4 % ein.

Im Jahr 2030 stehen zunächst PV-Anlagen (PV-Freifläche und PV-Dachanlagen) hinsichtlich des Anteils am Gesamtrohstoffbedarf, an zweiter Stelle. Im Jahren 2040 sind die Anteile von CSP-

Parabolrinnenkraftwerken am gesamten Rohstoffbedarf allerdings höher. 2050 liegen die Anteile von Anlagen zur CO<sub>2</sub>-Bereitstellung ebenfalls auf ähnlichem Niveau wie die Anteile von CSP-Parabolrinnenkraftwerken.

Photovoltaikanlagen (Freifläche und Dachfläche) nehmen 2030 etwa 19-21 % des gesamten Rohstoffbedarfs weltweit ein. Dieser Anteil verringert sich über den Zeitverlauf; im Jahr 2040 sind es noch 11-13 %, im Jahr 2050 noch 6-11 %. Über alle Stützjahre hinweg übersteigen die PV-Dachanlagen die Anteile der PV-Freiflächenanlagen. Im GreenSupreme-Szenario ist der Unterschied 2030 am deutlichsten, hier übersteigt der Rohstoffbedarf der PV-Dachflächen den der PV-Freiflächen mit 14 Prozentpunkten. Im GreenLate-Szenario und im GreenSupreme-Szenario liegen die globalen Rohstoffbedarfe der PV-Dachflächenanlagen im Jahr 2050 jedoch weniger als ein Prozentpunkt über dem der Freiflächenanlagen; im H<sub>2</sub>-Szenario sind es noch 5 Prozentpunkte.

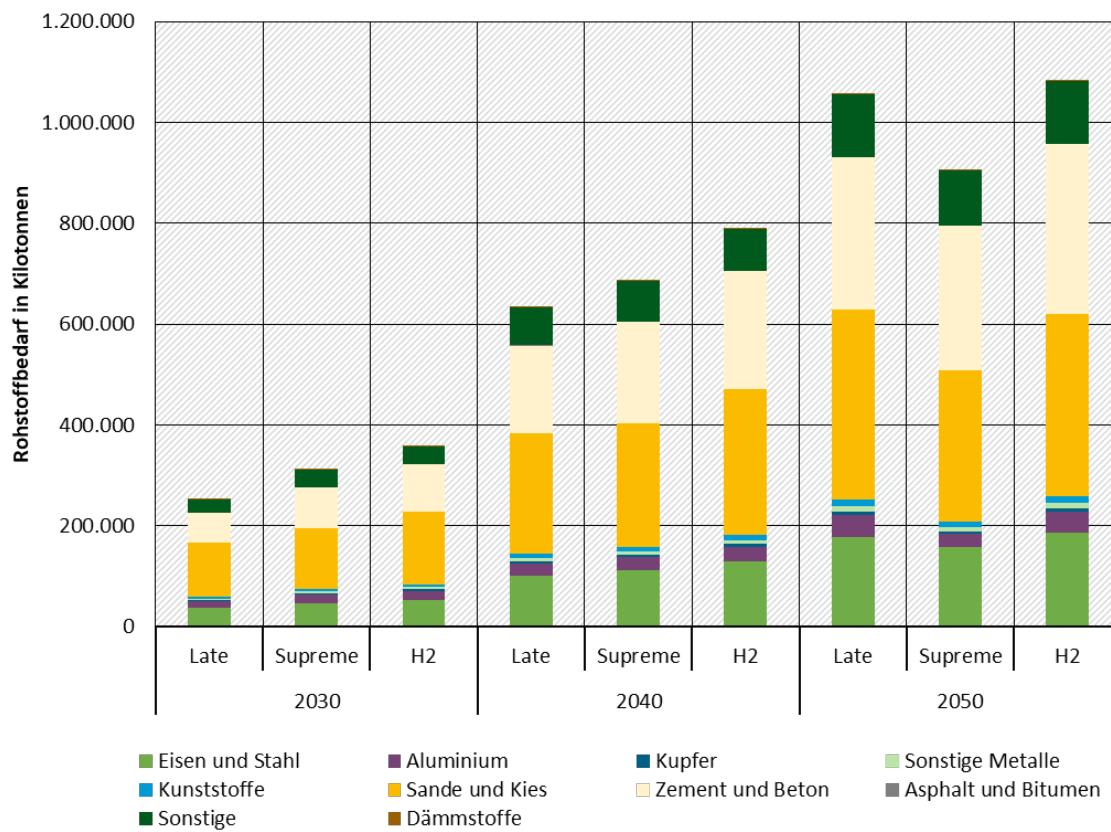
An Bedeutung und damit auch an Rohstoffbedarfen gewinnen die solarthermischen Kraftwerke (CSP). Dabei liegt das Hauptaugenmerk – bedingt durch den geringeren Fokus auf Solartürme – klar auf den Parabolrinnenkraftwerken. Letztere nehmen im GreenSupreme-Szenario in 2050 18 % des Gesamtrohstoffbedarfs ein, im H<sub>2</sub>-Szenario sowie im GreenLate-Szenario sind es 15 %. Im Vergleich zu 2030 ist deren Anteil deutlich gestiegen (um den Faktor 1,6-1,7). Solartürme hingegen beanspruchen in keinem Szenario mehr als 0,1 % des globalen Rohstoffbedarfs.

Eine weitere Technologie deren Rohstoffbedarf bis 2050 stark zunimmt sind die Anlagen zur CO<sub>2</sub>-Bereitstellung. Im Jahr 2030 ist deren Anteil noch gering und liegt bei 3-5 %. Bereits im Jahr 2040 liegt der Anteil knapp dreifach so hoch und erreicht im Jahr 2050 einen Anteil von 15-18 %. Das bedeutet, dass im Jahr 2050 etwa 160-166 Mio. t Rohstoffe für den Zubau von DAC-Anlagen benötigt werden.

Einer Reihe weiterer Schlüsseltechnologien kommt im Hinblick auf den globalen Rohstoffbedarf eine vergleichsweise untergeordnete Rolle zu, was sich über die Stützjahre in einem Anteil von maximal 2 % (bei den Elektrolyseanlagen) und etwa 1 % oder niedriger manifestiert. Letztere umfassen Geothermieanlagen, Wärmepumpen, Energiespeicher, Brennstoffzellen (PEMFC und SOFC), sowie die Methanisierung und Methanolsynthese, ebenso wie die FT-Synthese und Meerwasserentsalzungsanlagen. Keine dieser Schlüsseltechnologien übersteigt die Marke von 3 Mio. t Rohstoffe im Jahr 2050.

Welche Rohstoffe konkret zu welchen Anteilen benötigt werden wird in Abbildung 39 verdeutlicht. Diese zeigt den weltweiten Rohstoffbedarf in den jeweiligen Stützjahren und Szenarien differenziert nach ausgewählten Rohstoffen.

**Abbildung 39: Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien differenziert nach Rohstoffen**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

Nicht-metallische Mineralien wie Sande, Zement und Beton haben über alle Jahre und Szenarien hinweg den größten Anteil, welcher zwischen 64-67 % variiert. Sande (u. a. auch Quarzsand) und Kies sind für die meisten Technologien als mineralischer Baustoff essenziell und nehmen den Großteil des Rohstoffbedarfs ein. Im Jahr 2030 liegt dieser bei ca. 39-43 %. Im Jahr 2050 liegt der Anteil leicht geringer, aber stellt mit 33-36 % weiterhin die größte Kategorie. Der Bedarf an Zement und Beton steigt ausgehend vom Jahr 2030 mit 60-95 Mio. t deutlich um den Faktor 3,5-5 auf knapp 287-337 Mio. t im Jahr 2050 an. Prozentual bedeutet dies einen Anstieg von ca. 24-27 % Anteil am Rohstoffbedarf im Jahr 2030 auf 29-32 % im Jahr 2050.

Metallische Rohstoffe haben über die Jahre hinweg einen Anteil von ca. 21-23 % am gesamten Rohstoffbedarf. Im Mittel gehen weitere 13 % des Rohstoffbedarfs auf Materialien wie Kunststoffe, Dämmstoffe und die Kategorie Sonstige zurück.

Bei den Metallen nehmen erwartungsgemäß Eisen und Stahl den größten Posten ein; im Jahr 2030 gehen 14-15 % des gesamten Rohstoffbedarfs auf Eisen und Stahl zurück. Deren Anteil steigt bis 2050 sogar noch leicht auf 17 % in allen drei Szenarien an.

Aluminium ist in der Rohstoffauswertung das zweitbedeutendste Metall, jedoch mit einem leicht abnehmenden Trend bis 2050. Im Jahr 2030 werden je nach Szenario zwischen 14-18 Mio. t Aluminium für den Zubau der Schlüsseltechnologien benötigt, das bedeutet einen Anteil von 5-6 % am gesamten Rohstoffbedarf. Auf Aluminium folgt Kupfer mit einem Anteil von rund 1 % über alle Jahre und Szenarien (mit Ausnahme des GreenSupreme-Szenarios im Jahr 2050 mit einem Kupferanteil von nur 0,4 %). In absoluten Mengen werden 2050 rund 7 Mio. t Kupfer im GreenLate- und im H<sub>2</sub>-Szenario für die Schlüsseltechnologien benötigt, im GreenSupreme-Szenario rund 4 Mio. t.

Für Kupfer würde allein der Bedarf für Schlüsseltechnologien im Jahr 2050 etwa 15-26 % der aktuellen Fördermengen (Jahr 2022) beanspruchen, für Aluminium läge der Bedarf 2050 sogar bei 39-63 % der aktuellen Fördermenge. Hierzu wird in Kapitel 6.17.3 für weitere Materialien ausführlich darauf eingegangen, ob die Rohstoffbedarfe durch aktuelle Fördermengen überhaupt bedient werden können.

Sonstige Metalle nehmen, ebenso wie Kupfer, rund 1 % des gesamten Rohstoffbedarfs ein. Diese umfassen u. a. Nickel, Zink, Zinn, Blei, Gold, Silber und Siliziummetall. Den höchsten Bedarf für diese Metalle gibt es im H<sub>2</sub>-Szenario in 2050; es werden über 11 Mio. t sonstige Metalle benötigt.

Kunststoffe haben einen Anteil am gesamten Rohstoffbedarf, der je nach Jahr und Szenario bei knapp über 1 % schwankt. Während 2030 nur 3-5 Mio. t Kunststoffe für die Schlüsseltechnologien gebraucht werden, sind es im Jahr 2050 etwa 2,5-4-mal so viele.

Der Posten der sonstigen Rohstoffe, die nicht einzeln ausgewiesen wurden, hat 2030 einen Anteil von 10-11 %, im Jahr 2050 dann rund 11-12 %. In absoluten Werten liegt der höchste Bedarf der Kategorie Sonstige bei einem Rohstoffbedarf von rund 124 Mio. t im Jahr 2050 im GreenLate- sowie im H<sub>2</sub>-Szenario.

#### **Einordnung zu anderen Studien/Prognosen**

Die Frage, wie viel Rohstoffe es für die Bewältigung der Energiewende oder eines definierten Transformationspfades braucht, wird im Rahmen verschiedener Studien untersucht.

Ausgewählte Rohstoffbedarfe aus diesem Projekt sollen hier im Kontext der Materialbedarfe anderer Prognosen kurz eingeordnet werden. Die Materialbedarfe werden denen des H<sub>2</sub>-und GreenSupreme-Szenarios im Jahr 2050 gegenübergestellt, weil diese die höchsten bzw. niedrigsten Rohstoffbedarfe aufweisen.

Da vielfach in Studien unterschiedliche Technologien, wie auch Rohstoffe betrachtet werden, und insofern eine eingeschränkte Vergleichbarkeit besteht, wird folgend vorrangig der errechnete Bedarf an Kupfer aus REFINE für PV- und Windkraftanlagen entsprechenden Ergebnissen aus anderen Studien gegenübergestellt (Tabelle 35). Für das Jahr 2050 liegt der Kupferbedarf für PV- und Windkraftanlagen in Refine bei 3,0 Mio. t (GreenSupreme) bzw. 5,9 Mio. t (H<sub>2</sub>) und insgesamt – über alle Schlüsseltechnologien – bei 3,9 Mio. t (GreenSupreme) bzw. 6,8 Mio. t (H<sub>2</sub>).

Die (IEA 2023b) stellt mit dem „Critical Minerals Data Explorer“ eine Reihe von globalen Nachfrageprognosen für insgesamt 37 kritische Rohstoffe zur Verfügung, die für die Bereitstellung erneuerbarer Energietechnologien („clean energy technologies“) notwendig sind. Das Onlinetool bietet die Möglichkeit Nachfrageprognosen bis zum Jahr 2050 für verschiedene Energieszenarien und technologische Entwicklungstrends auszuweisen. Als Vergleichsszenario kann etwa das „Net Zero Emissions by 2050 Scenario“ dienen, um die Kupferbedarfe verschiedener Schlüsseltechnologien und Stützjahre bis 2050 darzulegen. Im Jahr 2040 fallen auf Basis des genannten Szenarios für PV- und Windenergieanlagen Kupferbedarfe von rund 3,4 Mio. Tonnen und im Jahr 2050 rund 3,2 Mio. Tonnen an.

(Marscheider-Weidemann et al. 2021) legen in einer Spezialanalyse verschiedene Rohstoffbedarfe ausgewählter Zukunftstechnologien dar. Im Bericht sind über 20 kritische Metalle genannt, deren Bedarf sich in kaum zwei Jahrzehnten vervielfachen dürfte, wenn die Umsetzung einer vollständigen Energiewende realisiert wird. Für Kupfer wurde beispielsweise eine Bedarfsabschätzung für das Jahr 2040 für folgende Technologien vorgenommen: Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge, Legierungen für den Airframe-Leichtbau, Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL), Feststoffbatterie, Quantencomputer, Dünnschicht-Photovoltaik, Wasser-Elektrolyse, CCS – Carbon Capture and Storage, Windkraftanlagen,

Meerwasserentsalzung, Rohstoffliches Recycling (von Kunststoffen), Ausbau Stromnetz und induktiver Übertrag elektrischer Energie. Der Kupferbedarf für diese Technologien könnte mit 5,5-9,2 Mio. t einen Anteil von 27-45 % der Primärproduktion von 2018 einnehmen. Der Bedarf an Kupfer alleine für Windkraftanlagen liegt nach (Marscheider-Weidemann et al. 2021) im Jahr 2040 bei 121-355 Kilotonnen.

Die Roadmap der International Copper Association (ICA) stellt außerdem eine Prognose auf, die von einem starken Regulierungsschub bis 2030 und einer aggressiven Einführung erneuerbarer Energien und der Elektrifizierung in naher Zukunft ausgeht. Infolge der Energiewende, des Bevölkerungswachstums und der wirtschaftlichen Entwicklung wird sich laut (ICA 2023) der jährliche Bedarf an raffiniertem Kupfer bis 2050 gegenüber 2020 voraussichtlich verdoppeln und 50,1 Mio. Tonnen betragen. Rund 38 % des gesamten Kupferbedarfs 2050 würde dabei auf das Bauwesen entfallen, 21 % auf Elektrik und Elektronik, 17 % auf Industriemaschinen und -ausrüstung, 13 % auf den Transport und 10 % auf Konsumgüter. Wenn Maßnahmen ergriffen werden, um den globalen Temperaturanstieg auf 1,5°C zu begrenzen, könnte die Nachfrage nach raffiniertem Kupfer bis 2050 sogar noch höher liegen und auf 57 Millionen Tonnen steigen. Details zu Bedarfen einzelner Technologien werden nicht ausgewiesen (ICA 2023).

**Tabelle 35: Vergleich der Kupferbedarfe für PV und WEA (H<sub>2</sub>-Szenario) mit anderen Prognosen/Studien**

	REFINE (GreenSupreme) in Mio. Tonnen (PV/WEA)	REFINE (H <sub>2</sub> -Szenario) in Mio. Tonnen (PV/WEA)	IEA (2023) in Mio. Tonnen (PV/WEA)	Marscheider-Weidemann et al. (2021) in Mio. Tonnen*	ICA (2023) in Mio. Tonnen**
2020		-	1,2 (2022)	-	25
2030	3,1	3,4	3,6	-	33,5
2040	3,6	4,5	3,4	5,5 - 9,2	43,3
2050	3,0	5,9	3,2	-	50,1

Quelle: eigene Darstellung ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023); Anmerkung: \*Die betrachteten Technologien umfassen: Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge, Legierungen für den Airframe-Leichtbau, Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL), Feststoffbatterie, Quantencomputer, Dünnsschicht-Photovoltaik, Wasser-Elektrolyse, CCS – Carbon Capture and Storage, Windkraftanlagen, Meerwasserentsalzung, Rohstoffliches Recycling (von Kunststoffen), Ausbau Stromnetz und induktiver Übertrag elektrischer Energie; in den anderen Prognosen werden nur die Materialbedarfe für PV- und Windkraftanlagen ausgewiesen. \*\*gesamtwirtschaftlicher Kupferbedarf (s. Text).

Die in Tabelle 35 dargestellten Kupferbedarfe zeigen, dass die in den REFINE -Szenarien berechneten Bedarfe für die Schlüsseltechnologien PV und WEA in ähnlicher Größenordnung liegen wie in anderen Studien. Dabei liegen die Kupfer Bedarfe des GreenSupreme-Szenarios sehr nah an (IEA 2023b), während das H<sub>2</sub>-Szenario in der Tendenz im Pfad leicht höher liegt. Die etwas höhere Bandbreite bei (Marscheider-Weidemann et al. 2021) umfasst neben PV und WEA auch weitere ausgewählte Technologien. Gegenüber den nach (ICA 2023) geschätzten gesamtwirtschaftlichen Kupferbedarfen liegen die Bedarfe für Schlüsseltechnologien bei einem Anteil von grob etwa 10 %.

## 6.17.2 Rohstoffaufwand für PtX-Importe

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Rohstoffaufwendungen für die Importe von vier PtX-Energieträgern nebeneinander dargestellt: Elektrolyse-Wasserstoff (sowohl End-

als auch Zwischenprodukt)<sup>25</sup>, Methan (Synthetic Natural Gas, SNG) hergestellt mit CO<sub>2</sub> aus Direct Air Capture (DAC), Methanol mit DAC und Fischer-Tropsch-(FT-) Kraftstoff mit DAC.

Sowohl in Deutschland als auch in EU ohne DE sind in den Szenarien Importe von PtX-Produkten notwendig, um deren Bedarf zu decken. Dies entweder, weil davon ausgegangen wird, dass aufgrund von günstigeren Standortbedingungen in anderen Regionen keine eigene Produktion in Deutschland und der EU ohne DE stattfindet oder weil die eigenen Kapazitäten nicht ausreichen, um den Bedarf zu decken. Die Importmengen unterscheiden sich in den betrachteten Szenarien.

Abbildung 40 zeigt die Rohstoffaufwendungen, die durch die PtX-Importe nach Deutschland und in die EU ohne DE anfallen, differenziert nach den entsprechenden Schlüsseltechnologien.

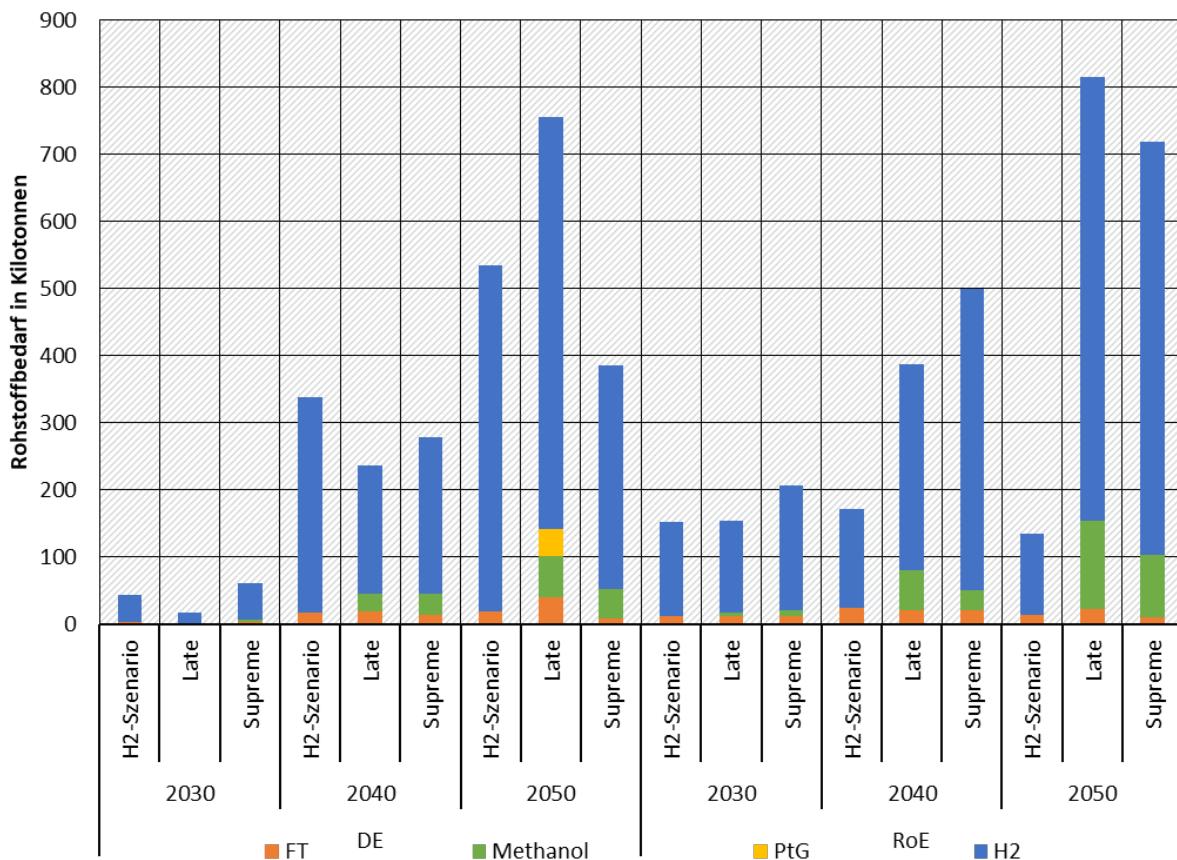
Für Deutschland belaufen sich die Rohstoffaufwendungen im Jahr 2030 im H<sub>2</sub>-Szenario auf rund 45 kt, die zu einem Anteil von 91 % auf Wasserstoff als Zwischenprodukt für PtX-Importe zurückgehen; lediglich 9 % der Rohstoffaufwendungen durch PtX-Importe entfallen auf FT-Kraftstoffe. Im Jahr 2040 steigen die Rohstoffaufwendungen im H<sub>2</sub>-Szenario auf 338 kt; knapp 95 % (320 kt) machen die Aufwendungen für Wasserstoff-Elektrolyse aus. Im Jahr 2050 liegen die Rohstoffaufwendungen im H<sub>2</sub>-Szenario bei rund 535 kt; etwa 97 % davon machen die Aufwendungen für Wasserstoff aus.

In der EU ohne DE nehmen die Rohstoffaufwendungen für die Importe im H<sub>2</sub>-Szenario im Zeitraum 2030-2040 zunächst zu, zwischen 2040-2050 allerdings wieder ab; über den Zeitverlauf nehmen in den GreenSupreme- und GreenLate-Szenarien die Rohstoffaufwendungen deutlich zu. Am höchsten sind sie im GreenLate-Szenario im Jahr 2050 und liegen bei über 815 kt. Im GreenSupreme-Szenario sind es im gleichen Jahr rund 718 kt im H<sub>2</sub>-Szenario lediglich 135 kt.

---

<sup>25</sup> Wasserstoff als Zwischenprodukt wird nicht als Produkt selbst, sondern in Form des mit ihm hergestellten PtX-Endprodukts importiert. Da die Rohstoffbedarfe bei dieser Betrachtung nach Nutzungsort zugerechnet werden, werden hier die Bedarfe von Wasserstoff als Zwischenprodukt ebenfalls der importierenden Region zugeschrieben.

**Abbildung 40: Rohstoffaufwendungen der PtX-Importe (nach Nutzungsort)**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

In den Green-Szenarien wird der Bedarf an Elektrolyse-Wasserstoff als *Endprodukt* aller Regionen grundsätzlich durch Eigenerzeugung innerhalb der Region gedeckt. Im H<sub>2</sub>-Szenario allerdings, wird der Bedarf in Deutschland (ab 2040) zusätzlich zur Eigenerzeugung mit Importen aus der EU ohne DE gedeckt. Der Rohstoffaufwand für Elektrolyse-Wasserstoff, der als *Zwischenprodukt* für die Produktion von weiteren PtX-Produkten genutzt wird, wird zusätzlich in Form des jeweiligen PtX-Endprodukts aus der Welt ohne EU in die beiden Regionen EU ohne DE und nach DE exportiert. Die Rohstoffaufwendungen für den Import von Elektrolyse-Wasserstoff als *Endprodukt* aus der EU ohne DE machen 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario in Deutschland rund 69 % des gesamten Rohstoffbedarfs für Wasserstoff-Importe (End- und Zwischenprodukt) aus.

FT-Kraftstoffe werden ausschließlich in der Region Welt ohne EU produziert. Der Bedarf an FT-Kraftstoffen in Deutschland und in der Region EU ohne DE wird über Importe von außerhalb der EU gedeckt. In Deutschland erreichen die Rohstoffaufwendungen im Jahr 2050 im GreenLate-Szenario mit etwa 40 kt den höchsten Wert, im GreenSupreme-Szenario bedarf es lediglich 9,5 kt. In der EU ohne DE liegen die Rohstoffaufwendungen für die FT-Synthese je nach Jahr und Szenario zwischen minimal 11 kt (im Jahr 2050 im GreenSupreme-Szenario) und maximal 24 kt im H<sub>2</sub>-Szenario im Jahr 2040.

Für PtL-Methanol wird ausschließlich im H<sub>2</sub>-Szenario eine Eigenproduktion innerhalb der Regionen angenommen, weshalb in diesem Szenario keine Importe nötig sind. In den GreenLate- und GreenSupreme-Szenarien findet die Produktion von PtL-Methanol ausschließlich in der Region Welt ohne EU statt. In der EU ohne DE liegt der Rohstoffbedarf für PtL-Methanol-Importe im Jahr 2050 bei rund 92 kt im GreenSupreme-Szenario und bei rund 132 kt im GreenLate-

Szenario. In Deutschland werden im Jahr 2050 zwischen 43 kt im GreenSupreme-Szenario und 61 kt im GreenSupreme-Szenario für die PtL-Methanol-Bereitstellung benötigt.

Im GreenLate-Szenario wird PtG-Methan importiert, denn erst 2050 wird in Deutschland PtG-Methan hergestellt. Die produzierten Mengen reichen jedoch nicht aus, um den hohen Bedarf im Jahr 2050 zu decken, weshalb rund 15 Mio. t an PtG-Methan aus der Welt ohne EU importiert werden (siehe Kapitel 6.8.2). Der Rohstoffanteil der Importe am deutschen PtG-Methan 2050 liegt etwa bei 80 % des gesamten PtG-Methan Rohstoffbedarfs. Die Rohstoffaufwendungen dieser Importe liegen dabei etwa in der Größenordnung der Methanol- oder FT-Synthese.

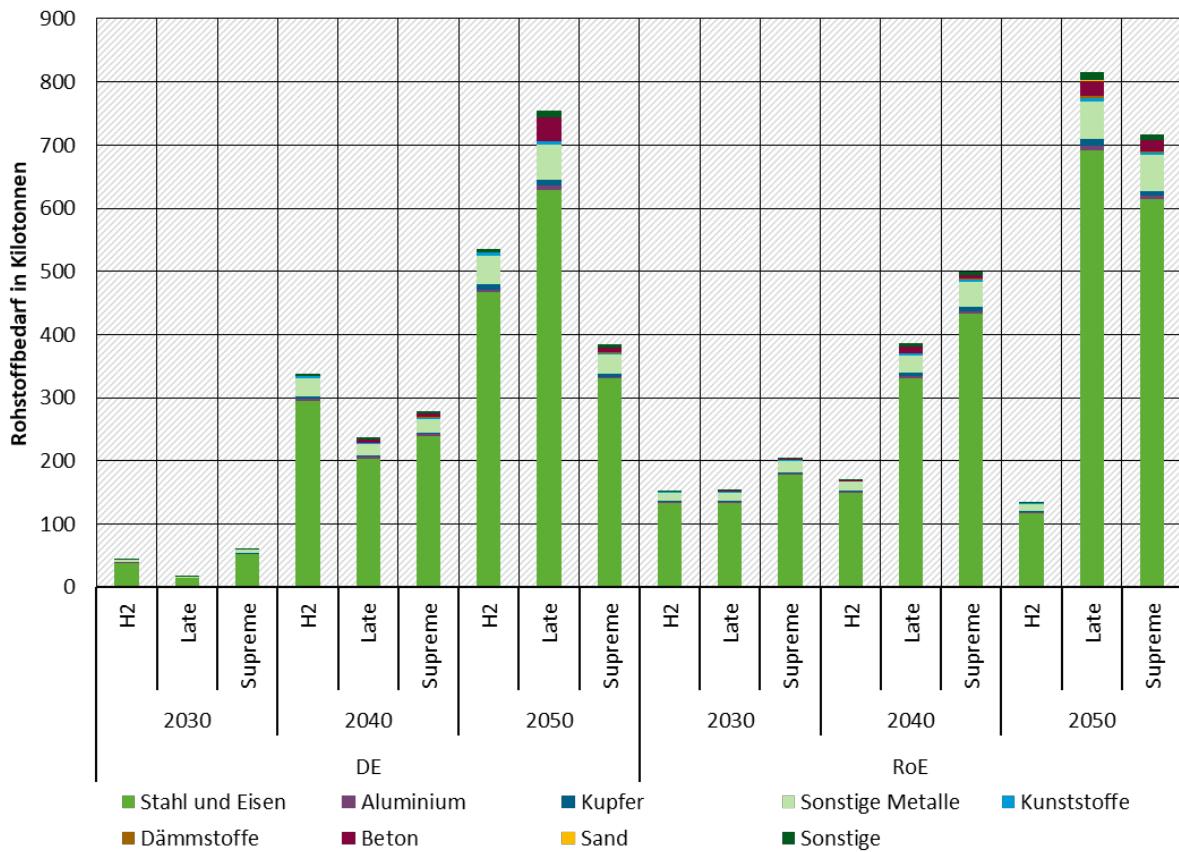
Abbildung 41 zeigt die Rohstoffaufwendungen der PtX-Importe differenziert nach ausgewählten Rohstoffen und Materialgruppen. Es ist deutlich erkennbar, dass der Eisen- und Stahlbedarf die weiteren Materialien dominiert. Außerdem relevant sind auch sonstige Metalle wie Zink, Zinn und Nickel, welche v. a. bei der Wasserstoff-Herstellung und Methanolsynthese wichtige Inputmaterialien sind, sowie Dämmstoffe.

Sowohl für die Importe nach Deutschland als auch in die EU ohne DE haben die Rohstoffaufwendungen für Stahl und Eisen ähnlich hohe Anteile am Gesamtaufwand; diese variieren je nach Szenario und Jahr zwischen 85-88 %. In Deutschland fallen die Rohstoffaufwendungen für Stahl und Eisen sowie für die sonstigen Metalle im GreenLate-Szenario jeweils 2030 und 2040 am niedrigsten aus, im Jahr 2050 liegen sie im GreenSupreme-Szenario am niedrigsten. In der EU ohne DE liegen die Aufwendungen für Stahl und Eisen über den Zeitverlauf 2030-2050 im H<sub>2</sub>-Szenario am niedrigsten. So fallen im Jahr 2050 rund 118 kt Stahl und Eisen in der EU ohne DE für die Importe an.

Der Bedarf an sonstigen Metallen variiert je nach Szenario und Jahr zwischen 7-9 %. In Deutschland fallen 2050 zwischen 30 kt (GreenSupreme) und 55 kt (GreenLate) für die Importe an. Die Rohstoffbedarfe der sonstigen Metalle liegen in der EU ohne DE zunächst 2030 im GreenLate-Szenario am niedrigsten, 2050 erreichen sie rund 11 kt (H<sub>2</sub>-Szenario) und rund 60 kt (GreenLate).

Die Betonbedarfe schwanken über die Szenarien, Jahre zwischen 0-5 %. Die Kupferbedarfe sind mit 1,2-1,4 % recht moderat, noch niedriger fällt der Anteil von Aluminium aus, er erreicht nur 0,7-1,1 %. Die Kategorie Sonstiges nimmt sowohl in Deutschland als auch in der EU ohne DE je nach Szenario und Jahr 1-2 % ein.

**Abbildung 41: Rohstoffaufwand durch PtX-Importe differenziert nach Rohstoffen**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (Liebich et al. 2023)

### 6.17.3 Bewertung: Stehen die Rohstoffe zur Verfügung?

Die ermittelten Rohstoffbedarfe der Schlüsseltechnologien werden nachfolgend daraufhin untersucht, in welchem Verhältnis diese zu aktuellen globalen Produktionsmengen stehen.

Datengrundlage für die Raffinadeproduktion im Jahr 2022 von Kupfer, Aluminium, Stahl und weiteren Metallen ist der Mineral Commodity Summary Bericht der U.S. Geological Survey. Ergänzt werden die Daten vereinzelt durch die British Geological Survey (für Siliziummetall) (British Geological Survey 2023; USGS 2023b).

Fördermengen für Sande und Steine (Aggregates) stammen vom Global Aggregates Information Network (GAIN) (O'Brian 2022) und der European Aggregates Association (European Aggregates Association 2022). Zur Abschätzung der Sandförderung wurde der Anteil der Bausande (40 % unbound structural material) von European Aggregates Association übernommen und auf die globale Produktion übertragen. Produktionsmengen für Kunststoffe wurden von PlasticsEurope genutzt (Plastics Europe 2022).

Die genutzten und ermittelten Förder- und Produktionsmengen sind in Tabelle 36 zusammengetragen.

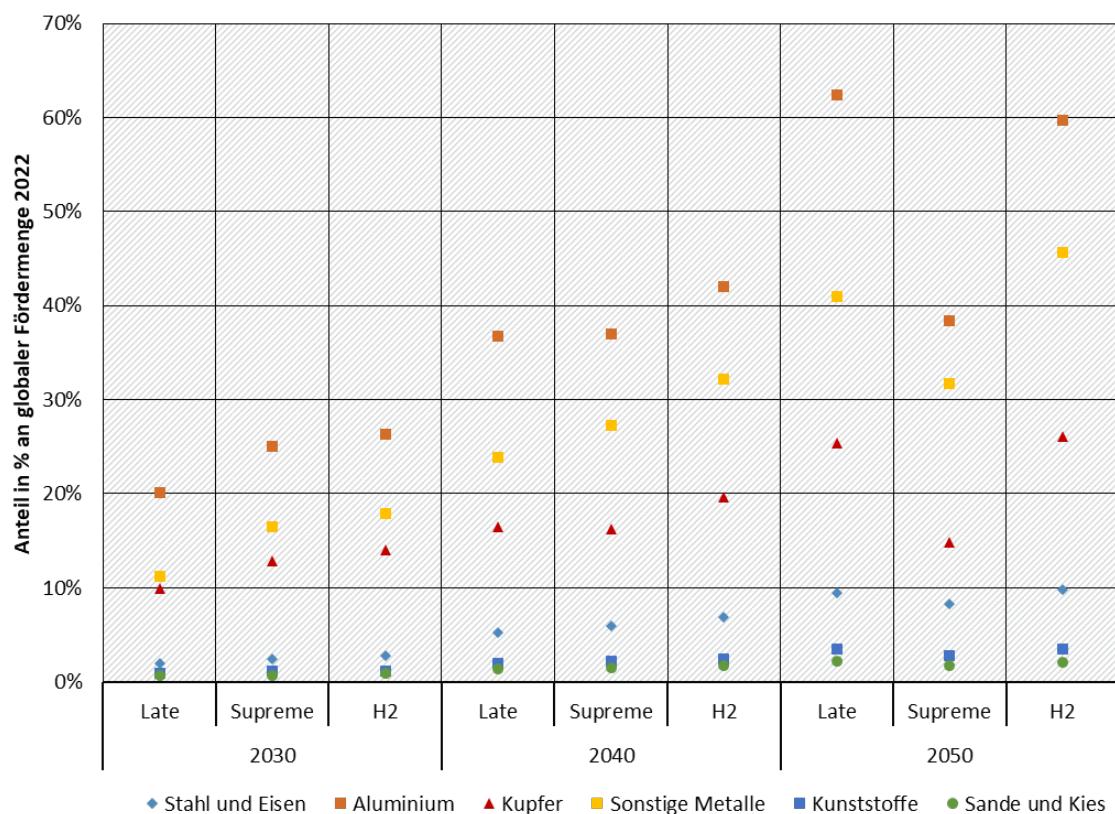
**Tabelle 36: Globale Produktionsmengen verschiedener Materialien im Jahr 2022**

Rohstoff	Menge in kt (Inhalt)	Vermerk / Quelle
Stahl	1.900.000	(USGS 2023b)
Aluminium	69.000	(USGS 2023b)
Kupfer	26.000	(USGS 2023b)
Nickel	3.300	(USGS 2023b)
Zink	13.000	(USGS 2023b)
Zinn	310	(USGS 2023b)
Blei	4.500	(USGS 2023b)
Siliziummetall	3.460	(British Geology Survey 2023)
Silber	26	(USGS 2023b)
Platin	0,2	(USGS 2023b)
Vanadium	100	USGS 2023)
Sande	17.086.800	Globale Produktionsmenge für Sande und Steine von (O'Brian 2022) und Übertragung 40 % Anteil der Sande (unbound structural material) aus (European Aggregates Association 2022)
Kunststoffe	391.000	Produktionsmenge 2021 (Plastics Europe 2022)

Quelle: eigene Darstellung, ifeu

Die in Kapitel 6.17.1 ermittelten Gesamtrosstoffbedarfe der Schlüsseltechnologien in den verschiedenen Szenarien und Stützjahren wird mit den in Tabelle 36 gelisteten Produktions- und Fördermengen in Relation gesetzt. In Abbildung 42 sind die abgeleiteten prozentualen Anteile der jeweiligen Rohstoffbedarfe an den heutigen Fördermengen (für das Jahr 2022) für ausgewählte Materialien eingetragen.

**Abbildung 42: Globaler Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien als %-Anteil der weltweiten Förder-/Produktionsmenge im Jahr 2022**



Quelle: eigene Darstellung, ifeu/ecoinvent, (British Geology Survey 2023; European Aggregates Association 2022; Liebich et al. 2023; O'Brian 2022; Plastics Europe 2022; USGS 2023b)

Notiz: Sonstige Metalle umfassen Nickel, Zink, Zinn, Silber, Blei, Platin, Vanadium und Siliziummetall

Die Ergebnisse zeigen, dass in keinem der Szenarien und Jahre für eines der ausgewählten Materialien die derzeitige Förder- bzw. Produktionsmenge überstiegen wird. Die Rohstoffbedarfe stellen allerdings lediglich die Materialmengen dar, die für den Zubau der hier ausgewerteten Schlüsseltechnologien in den jeweiligen Jahren notwendig sein werden und lässt alle weiteren sonstigen Nutzungen und Rohstoffnachfragen außer Acht. Wie zuvor in Kapitel 5.3.4 beschrieben, bewegen sich die Rohstoffaufwendungen für Schlüsseltechnologien in Relation zu den Gesamtrohstoffaufwendungen in einer Größenordnung von lediglich 1,3 bis 1,6 % (im Jahr 2050 in allen Regionen). (Für eine detailliertere Einordnung der Schlüsseltechnologien und des Gesamtstoffbedarfs nach URMOD-3R siehe Kapitel 5.8).

Dass im Jahr 2030 insbesondere die Anteile von Kupfer und sonstigen Metallen bereits mehr als 10 % und die Anteile von Aluminium 20 % (GreenLate) bis sogar 26 % (H<sub>2</sub>-Szenario) der aktuellen Fördermenge beanspruchen zeigt, dass es hier zu Konflikten mit anderen Rohstoffnachfragen anderer Sektoren kommen kann und eine Steigerung der Fördermengen besonders wichtig wird. Interessant ist, dass sich der Bedarf von Kupfer im Jahr 2050 im GreenSupreme-Szenario wieder entspannt. 2030 werden im GreenSupreme-Szenario 13 %, 2040 rund 16 % der aktuellen Fördermenge benötigt, allerdings sinkt der Anteil 2050 auf 15 %. Die sonstigen Metalle nehmen hingegen im Jahr 2050 Anteile an aktuellen Raffinadeproduktionen von 32 % in Green Supreme, 41 % im GreenLate-Szenario und 46 % in H<sub>2</sub>-Szenario ein. Interessant ist, dass allein Zink (das für WEA-Onshore benötigt wird) im Jahr 2050 je nach Szenario einen Anteil von 42-50 % an den gesamten sonstigen Metallen der

Schlüsseltechnologien hat. Auf Siliziummetall, das für PV-Dachanlagen verbaut wird, entfällt im Jahr 2050 ein Anteil von 15-31 % der sonstigen Metalle.

Der Anteile des Aluminiumbedarfs an den globalen Fördermengen liegt deutlich höher als der Anteil sonstiger Metalle und nimmt im Jahr 2050 im GreenLate-Szenario rund 63 %, im H<sub>2</sub>-Szenario 60 % und im GreenSupreme-Szenario rund 39 % der heutigen Aluminiumverhüttung in Anspruch.

Die Anteile von Stahl an der aktuellen Produktionsmenge von Rohstahl liegen im Jahr 2040 bei 5-7 % und steigen 2050 auf 8-10 % an. Auch hierfür sind die Anteile im GreenSupreme-Szenario vergleichsweise geringer.

Für Kunststoffe sowie Sande und Kies liegen die Anteile je nach Jahr deutlich unter 5 %. Deren Anteile steigen leicht zwischen 2030 und 2050, sodass sie im Jahr 2050 zwischen 3-4 % bzw. 2 % betragen.

#### **6.17.4 Vergleich URMOD-3R und Auswertung nach Bottom-up-Ansatz**

Die Rohstoffaufwendungen für Schlüsseltechnologien, die benötigt werden, um verschiedene Transformationspfade zu beschreiten, wurden in diesem Projekt auf zwei unterschiedliche methodische Herangehensweisen berechnet. Im ersten Teil erfolgte eine Berechnung nach einem Top-down-Ansatz, der auf einem multi-regionalen Input-Output Modell (URMOD-3R) basiert (siehe Kapitel 4). Im zweiten Teil wurden Rohstoffbedarfe für Schlüsseltechnologien basierend auf dem Bottom-up-Ansatz der prospektiven Ökobilanzmethode ausgewertet. Hierfür wurden die für die Ökobilanzmethode (Dittrich et al. 2024b) auf Basis der ecoinvent-Datenbank neu zusammengestellten Datensätze gesondert ausgewertet (vgl. Kap. 6.1).

Die Ergebnisse beider Ansätze sind aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen und methodischer Unterschiede nicht direkt miteinander vergleichbar. So unterscheiden sich die Ansätze beider Modelle hinsichtlich der Verfahrensweise zur Ermittlung der Rohstoffbedarfe. Die auf dem Bottom-up-Ansatz basierende Auswertung erfolgte ausschließlich für die einzelnen Schlüsseltechnologien, die im Fokus von REFINE stehen. Auf diese Weise war eine detaillierte Auswertung nach Einzelmetallen (etwa 15 Primärmetalle) und weiteren Materialien möglich. Allerdings verbleiben mit diesem Vorgehen Datenunsicherheiten, da eine Materialliste ausgewählt (gesamt etwa 270) und Abschneidekriterien gesetzt werden mussten.

Bei URMOD-3R handelt es sich um ein IOT-Modell, dass zum Ziel hat, die durch wirtschaftliche Konsum- und Produktionsaktivitäten in einer Volkswirtschaft ausgelöste Nutzung von Rohstoffen und anderer Ressourcen abzubilden. Es werden sowohl gesamtwirtschaftliche Indikatoren abgeleitet, wie insbesondere der Indikator RMC, als auch je nach Fragestellung nach wirtschaftlichen Aktivitäten differenzierte Ergebnisse, wie zum Beispiel der Ressourcenbedarf, der durch bestimmte Produktions- oder Konsumaktivitäten ausgelöst wird.

Für die Aufstellung von URMOD-3R werden für den jeweiligen Untersuchungszweck erforderliche spezielle Informationen in konsistenter Weise mit auf einer reichen Datenbasis beruhenden nationalen monetären Input-Output Tabellen (IOT) verknüpft.

Die IOT beruht als Bestandteil des Systems der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) auf einer umfassenden Datenbasis, deren Ergebnisse zu einem konsistenten System zusammengeführt werden. Die dazu genutzten Daten werden überwiegend gewonnen durch flächendeckende Erhebungen der amtlichen Statistik bei den einzelnen Unternehmen und anderen wirtschaftlichen Akteuren. Eine weitere wichtige Datenquelle sind an Verwaltungsvorgänge anknüpfende Statistiken, wie z. B. der Zollverwaltung (Außenhandelsstatistik), der Sozialverwaltung und der Finanzverwaltung. Darüber hinaus

werden auch Erhebungsergebnisse von Fachverbänden und ähnlichen Institutionen sowie partielle Einzelstudien genutzt.

Das IOT-Modell stellt insbesondere die Verflechtungsbeziehungen zwischen den wirtschaftlichen Aktivitäten (Produktion und letzte Verwendung) lückenlos dar. Definitionsgemäß gilt, dass für jede einzelne Gütergruppe das gesamte Aufkommen und die gesamte Verwendung übereinstimmen müssen. Damit ist gewährleistet, dass der Wirtschaftsprozess auf einem gegebenen Aggregationsniveau lückenlos und in konsistenter Weise abgebildet wird.

Bei URMOD-3R handelt es sich um eine sektorale tief gegliederte spezielle Variante des allgemeinen IOT-Modells. Bei der für die Ableitung von URMOD-3R erforderlichen Disaggregation einzelner Zellen der Ausgangs-IOT mit Hilfe von Zusatzinformation wird durch Abstimmungsbuchungen gewährleistet, dass die auf einer reichen Datenbasis gewonnenen Ausgangswerte erhalten bleiben. Mit den Ausgleichsbuchungen, welche die originären Zusatzinformationen abändern, können allerdings auch Unsicherheiten verbunden sein. Generell gilt, dass der Präzisionsgrad des Modells sich bei Betrachtung kleinerer Ausschnitte mit zunehmender Detailtiefe vermindert.

In Tabelle 37 werden die Ergebnisse der beiden Ansätze für Schlüsseltechnologien insgesamt gegenübergestellt. Die Tabelle bezieht sich auf den weltweiten Rohstoffbedarf für Schlüsseltechnologien im Jahr 2050 in GreenSupreme.

Für die Hauptmetalle Eisen, Kupfer und Aluminium liegen die Abweichungen betragsmäßig zwischen 3 % und 29 %, wenn Primär- und Sekundärrohstoffe zusammen betrachtet werden. Für die sonstigen Metalle kann nur der Primäranteil betrachtet werden, da in URMOD-3R nur ausgewählte Sekundärmetalle enthalten sind. U. a. deshalb kommt es hier bei URMOD-3R zu einem deutlich höheren Wert als bei der Auswertung nach Bottom-up-Ansatz.

Bei den nicht-metallischen Mineralien liegt das Ergebnis nach Bottom-up-Ansatz rund 26 % höher als die Werte aus URMOD-3R, wobei hier zu berücksichtigen ist, dass bei der Auswertung nach Bottom-up-Ansatz nur der Einsatz von Sand und Kies sowie von Zement und Beton ausgewiesen wurde.

Insgesamt zeigt sich, dass die Zahlen trotz der unterschiedlichen Methodik in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Die Abweichungen auf Ebene einzelner Metalle und einzelner Schlüsseltechnologien können höher ausfallen. Da URMOD-3R einen gesamtwirtschaftlichen Rohstoffbedarf modelliert und ausweist, während der Bottom-up-Ansatz spezifisch auf die Analyse der Rohstoffbedarfe der Schlüsseltechnologien ausgelegt ist, lassen sich in Letzterem die einzelnen Faktoren, welche die Rohstoffbedarfe der Technologien beeinflussen, gut identifizieren und ihre Wirkung nachvollziehen. Dem gegenüber ergeben sich durch den unterschiedlichen Ansatz in URMOD-3R viele dieser Faktoren Modell-endogen. Mit Blick auf die Ergebnisse zu den Schlüsseltechnologien bedeutet dies eine tendenziell höhere Datenunsicherheit für den Top-Down Ansatz. Ein umfassender Abgleich und eine Bewertung der Unterschiede sind in diesem Projekt allerdings nicht vorgesehen, hier sehen wir aber einen Ansatz für zukünftige Forschungsprojekte.

**Tabelle 37: Vergleich der Rohstoffbedarfe weltweit für die Schlüsseltechnologien in URMOD-3R und nach Bottom-up-Ansatz in GreenSupreme 2050**

Rohstoff	Einheit	URMOD-3R	Bottom-up-Ansatz	Unterschied
Eisen primär und sekundär	1000 t Metallgehalt	255.955	329.891	29%
Kupfer primär und sekundär	1000 t Metallgehalt	10.391	9.257	-11%
Aluminium primär und sekundär	1000 t Metallgehalt	78.673	76.150	-3%
Sonstige Metalle primär	1000 t Metallgehalt	48.990	7.859	-84%
Nicht-metallische Mineralien	1000 t RME/1000 t	555.091	699.330	26%

Quelle: eigene Berechnungen URMOD-3R

### 6.17.5 Zwischenfazit

Die Auswertungen der Rohstoffaufwendungen für die Schlüsseltechnologien ergeben vielfältige Ergebnisse. Für drei unterschiedliche Szenarien, sowie drei Regionen und je drei Stützjahre wurden sowohl spezifische als auch absolute Rohstoffbedarfe illustriert und diese wiederum differenziert nach mindestens fünf (bis zu 15) Rohstoffkategorien ausgewertet. Dieser Umfang und Detailgrad an Ergebnissen erfordert für eine zielgerichtete Kommunikation die Fokussierung auf einige wesentliche Erkenntnisse. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten hervorgehoben.

- ▶ Der Zubau der Schlüsseltechnologien erfordert einen erheblichen Rohstoffaufwand in den einzelnen Stützjahren, der ausgehend vom Jahr 2030 in den Szenarien recht kontinuierlich steigt. Im Jahr 2030 variiert der weltweite Rohstoffbedarf je nach Szenario zwischen 252 Mio. t und 358 Mio. t. Im Jahr 2040 variiert der Bedarf zwischen 633 Mio. t und 791 Mio. t. Im Jahr 2050 liegt der globale Rohstoffbedarf zwischen 907 Mio. t und 1.084 Mio. t.
- ▶ Im Zieljahr 2050 weist das ambitionierte GreenSupreme-Szenario mit deutlichem Abstand, im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien, den geringsten Rohstoffbedarf von 907 Mio. t auf, dieser liegt zwischen 14-16 % unter dem GreenLate-Szenario und dem H<sub>2</sub>-Szenario.
- ▶ Deutschland kommt ein Anteil von 1-2 % des globalen Rohstoffbedarfs zu; EU ohne DE beansprucht 4-9 % des Bedarfs und der Welt ohne EU kommt ein Anteil von 89-94 % zu, je nach Szenario und Jahr.
- ▶ Der globale Rohstoffbedarf fällt im Jahr 2030 zunächst im GreenLate-Szenario am geringsten aus (252 Mio. t), was sich mit dem geringeren Ambitionsgrad im Hinblick auf die Geschwindigkeit der Transformation erklären lässt. Im gleichen Jahr liegt der Bedarf im H<sub>2</sub>-Szenario am höchsten (358 Mio. t). Auch im Jahr 2040 ist der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario noch am höchsten (791 Mio. t). Der Bedarf im GreenLate-Szenario (633 Mio. t) nähert sich deutlich an den Bedarf des GreenSupreme-Szenarios (687 Mio. t) an. Im Jahr 2050 fällt schließlich der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario mit 1.084 Mio. t am höchsten aus. Nur minimal darunter liegt das GreenLate-Szenario (1.058 Mio. t), bedingt durch die Notwendigkeit die langsame Transformation aufzuholen und auch weil bereits ein Großteil der Anlagen ersetzt werden müssen (z.B. PV-Dachanlagen). Die schnelle Umsetzung im GreenSupreme-Szenario zahlt sich mit dem geringsten Bedarf im Jahr 2050 aus (907 Mio. t).

- ▶ Der Rohstoffbedarf lässt sich im Wesentlichen auf fünf Schlüsseltechnologien zurückführen: den größten Anteil am jeweiligen Gesamtrohstoffaufwand pro Jahr und Szenario nehmen die Onshore-Windenergieanlagen ein (52-63% je nach Szenario und Jahr), gefolgt von der solarthermischen Kraftwerkstechnologie der Parabolrinnen (9-18 %), PV-Dachanlagen (3-17 %), der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung (3-18 %), PV-Freiland anlagen (3-8 %) und Offshore-Windenergieanlagen (3-4 %). Alle weiteren Schlüsseltechnologien haben einen Anteil von 2 % oder geringer.
  - In absoluten Werten werden im GreenSupreme-Szenario im Jahr 2050 etwa 472 Mio. t Rohstoffe für Onshore-Windenergieanlagen benötigt, 166 Mio. t für Parabolrinnenkraftwerke, 29 Mio. t für PV-Dachanlagen, 160 Mio. t für die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung, 27 Mio. t für PV-Freiflächenanlagen und 52 Mio. t für die restlichen Schlüsseltechnologien.
  - Im GreenLate-Szenario werden 2050 etwa 548 Mio. t Rohstoffe für Onshore-Windenergieanlagen benötigt, 159 Mio. t für Parabolrinnenkraftwerke, 64 Mio. t für PV-Dachanlagen, 166 Mio. t für die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung, 57 Mio. t für PV-Freiflächenanlagen und 64 Mio. t für die restlichen Schlüsseltechnologien.
  - Im H<sub>2</sub>-Szenario werden im Jahr 2050 etwa 582 Mio. t Rohstoffe für Onshore-Windenergieanlagen benötigt, 166 Mio. t für Parabolrinnenkraftwerke, 84 Mio. t für PV-Dachanlagen, 161 Mio. t für die CO<sub>2</sub>-Bereitstellung, 31 Mio. t für PV-Freiflächenanlagen und 59 Mio. t für die restlichen Schlüsseltechnologien.
- ▶ Es werden je nach Schlüsseltechnologie zwischen vier bis zwölf unterschiedlich betrachtete Rohstoffe und Rohstoffgruppen differenziert. Die wesentlichen Rohstoffbedarfe konzentrieren sich jedoch über alle Technologien (und Regionen, Szenarien und Jahre) hinweg auf Sand und Kies (33-43 %), Zement und Beton (24-32 %), Eisen und Stahl (14-17 %) sowie eine Kategorie aus sonstigen Rohstoffen (10-12 %). Den Metallen Aluminium und Kupfer kommen 3-6 % bzw. rund 1 % zu.
  - In absoluten Werten werden im GreenSupreme-Szenario im Jahr 2050 etwa 301 Mio. t Sande und Kies, 308 Mio. t weitere Rohstoffe (wie Kunststoffe, sonstige Metalle, Dämmstoffe sowie Asphalt und Bitumen), 287 Mio. t Zement und Beton, 158 Mio. t Eisen und Stahl, 109 Mio. t sonstige Rohstoffe, 27 Mio. t Aluminium, 4 Mio. t Kupfer und benötigt.
  - Im GreenLate-Szenario werden 2050 etwa 377 Mio. t Sande und Kies, 329 Mio. t weitere Rohstoffe, 302 Mio. t Zement und Beton, 179 Mio. t Eisen und Stahl, 124 Mio. t sonstige Rohstoffe, 43 Mio. t Aluminium und 7 Mio. t Kupfer benötigt.
  - Im H<sub>2</sub>-Szenario werden im Jahr 2050 etwa 362 Mio. t Sande und Kies, 365 Mio. t weitere Rohstoffe, 337 Mio. t Zement und Beton, 186 Mio. t Eisen und Stahl, 124 Mio. t sonstige Rohstoffe, 41 Mio. t Aluminium und 7 Mio. t Kupfer und benötigt.
- ▶ Je nach Perspektive, Nutzungsortperspektive oder produktionsortperspektive, variieren die Rohstoffaufwendungen der drei Regionen recht deutlich. Letztere umfasst neben der Produktion für den Eigenbedarf auch Aufwendungen für Exporte. Deutschland importiert eine Reihe von Produkten aus der EU ohne DE und der Welt ohne EU und hat demnach bei Betrachtung nach Nutzungsort einen höheren Rohstoffbedarf als bei alleiniger Berücksichtigung des produktionsortes.

- Für vier PtX-Energieträger sind sowohl Deutschland als auch die EU ohne DE auf Importe (weitestgehend) aus der Welt ohne EU angewiesen, um den Bedarf zu decken. Die Rohstoffaufwendungen für Wasserstoff, PtG-Methan, PtL-Methanol und Fischer-Tropsch-(FT-) Kraftstoffen fallen demnach in den Produktionsregionen Rohstoffaufwendungen an, die den importierenden Regionen zugewiesen werden können. Im GreenLate-Szenario fallen diese für Deutschland aufgrund der umfangreichen H<sub>2</sub>-Importe besonders deutlich aus. Im Jahr 2050 werden etwa 612 kt Rohstoffe für die H<sub>2</sub>-Importe benötigt, sowie 40 kt Rohstoffe für FT-Kraftstoffe.
- In der EU ohne Deutschland fallen ebenfalls die Rohstoffaufwendungen der PtX-Importe im Jahr 2050 am höchsten aus; für das GreenLate-Szenario werden etwa 661 kt für die H<sub>2</sub>-Bereitstellung, 132 kt Rohstoffe für die PtL-Methanolsynthese sowie weitere 22 kt Rohstoffaufwendungen für FT-Kraftstoffe im Ausland verursacht.
- ▶ In Relation zu heutigen Produktionsmengen (2022) übersteigt keiner der ermittelten und ausgewerteten Rohstoffbedarfe für die Schlüsseltechnologien derzeitige Produktionsniveaus. Allerdings müssen neben den Schlüsseltechnologien noch weitere Bedarfe anderer Industriesektoren gedeckt werden. Auch ohne diese Bedarfe nimmt insbesondere Aluminium bereits einen bemerkenswerten Anteil von 60 % im H<sub>2</sub>-Szenario und 63 % im GreenLate-Szenario ein; Kupfer und sonstige Metalle nehmen einen Anteil von 26 % bzw. 46 % im Jahr 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario ein. Stahl variiert je nach Jahr und Szenario zwischen 2-10 %. Kunststoffe nehmen zwischen 1-4 % und Sande und Kies zwischen 1-2 % aktueller Produktionsmengen ein. Diese Anteile zeigen insbesondere für Kupfer und Aluminium, dass es hier zu Konflikten mit anderen Rohstoffnachfragen anderer Sektoren kommen kann und eine Steigerung der Fördermengen relevant wird. Vor diesem Hintergrund und den damit möglicherweise steigenden Umweltbelastungen nimmt die Dringlichkeit zur Umsetzung weiterer Rohstoffeinsparungen weiter zu.
- ▶ Den Rohstoffaufwendungen zufolge empfiehlt sich das GreenSupreme-Szenario als zu präferierender Transformationspfad, da dieses Szenario insgesamt die geringsten Rohstoffmengen benötigen.

## 7 Umweltkosten der Transformationspfade

Umweltbelastungen führen zu monetären Schäden, beispielsweise in Form von Ernteausfällen, Schäden an Ökosystemen oder umweltbedingten Gesundheits- und Materialschäden. Jedes Kilogramm emittierter Treibhausgase oder Luftschatdstoffe hat damit einen Einfluss auf die gesellschaftliche Wohlfahrt, der mit Hilfe des Konzepts der Umweltkosten abgeschätzt werden kann.

Die Quantifizierung der Umweltkosten kann die gesellschaftlichen Kosten, die durch unterlassenen Umweltschutz entstehen, verdeutlichen und zeigen, welchen Nutzen eine ambitionierte Umweltpolitik für die Gesellschaft haben kann.

Das Ausmaß der Umweltwirkungen der drei Transformations-Szenarien GreenSupreme, GreenLate und dem H<sub>2</sub>-Szenario unterscheidet sich aufgrund unterschiedlicher Ambitionsniveaus im Hinblick auf die Defossilisierung Deutschlands bis 2050. Dies wirkt sich unmittelbar auf die gesellschaftlichen Kosten aus, die mit den unterschiedlichen Pfaden einhergehen. Diese Unterschiede werden im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

### 7.1 Vorgehen und Datengrundlage zur Berechnung der Umweltkosten

Grundlage zur Berechnung der Umweltkosten der drei Szenarien sind zum einen Umweltkostensätze des Umweltbundesamtes und zum anderen die Berechnungen der Umweltwirkungen zur Bereitstellung des Endenergiebedarfs im Rahmen des REFINE-Projekts (siehe Dittrich et al. 2024b).

Das Umweltbundesamt empfiehlt auf Basis der Methodenkonvention (aktuelle Version 3.1) Kostensätze, um gesellschaftliche Wohlfahrtseinbußen durch Umweltwirkungen zu monetarisieren. Die Umweltkosten durch Treibhausgasemissionen sind in Tabelle 38 dargestellt und werden nachfolgend als „Klimakosten“ bezeichnet. Es wird angenommen, dass die Umweltkosten im Zeitverlauf steigen werden, da der Schadenswert von Gebäuden und Infrastrukturen, die durch Extremwetterereignisse beschädigt werden, steigt. Die Umweltkosten fallen unterschiedlich hoch aus, je nachdem, wie stark das Wohlergehen heutiger und zukünftiger Generationen gegeneinander abgewogen wird. Bei einer Gleichgewichtung klimawandelverursachter Wohlfahrtseinbußen heutiger und zukünftiger Generationen (0 % Zeitpräferenzrate) fallen die Kosten mit 680 €/t CO<sub>2</sub>e im Jahr 2020 etwa 3,5-mal höher aus, als wenn die Wohlfahrt heutiger Generationen stärker gewichtet wird (1 % Zeitpräferenzrate). In 2020 liegen diese bei 195 €/t CO<sub>2</sub>e. Dieser Kostensatz ähnelt dem im 5. Sachstandsbericht des IPCC ermittelten Wert von 182 €<sub>2020</sub>/t CO<sub>2</sub> (Matthey und Bünger 2020).

Durchschnittliche Umweltkosten der Feinstaubbelastung (als Beispiel für nur einen Emittenten, der zur Luftverschmutzung beiträgt) werden auf 61.500 €<sub>2020</sub>/t Emission bemessen und quantifizieren damit Gesundheitsschäden, wie etwa Erkrankungen der Atemwege, Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder verminderte Lebenserwartungen durch Kurz- und Langzeitexposition<sup>26</sup>. Eine Zunahme der Kosten über die Zeit erfolgt nicht (Matthey und Bünger 2020).

---

<sup>26</sup> Der Kostensatz umfasst durchschnittliche Umweltkosten der Luftverschmutzung durch Emissionen aus unbekannter Quelle (in €<sub>2020</sub> / t Emission). Es liegen darüber hinaus weiter differenzierte Kostensätze für Luftschatdstoffemissionen aus unterschiedlichen Quellen wie Kleinfeuerungsanlagen und Verbrennungsprozessen in der Industrie, sowie aus dem Straßenverkehr vor.

**Tabelle 38: Klimakosten in Euro<sub>2020</sub> pro Tonne CO<sub>2</sub>e**

	1 % reine Zeitpräferenzrate (Höhergewichtung der Wohlfahrt der heutigen Generation gegenüber der Wohlfahrt künftiger Generationen)	0 % reine Zeitpräferenzrate (Gleichgewichtung der Wohlfahrt der Generationen)
2020	195	680
2030	215	700
2040	233	733
2050	250	765

Quelle: (Matthey und Bünger 2020) Hinweis: die Klimakosten für 2040 wurden interpoliert.

Die Ergebnisse der absoluten Umweltwirkungen der in REFINE betrachteten Szenarien, Regionen und Stützjahre sind ausführlich im REFINE Teilbericht Umweltwirkungen beschrieben und erläutert (siehe (Dittrich et al. 2024b)).

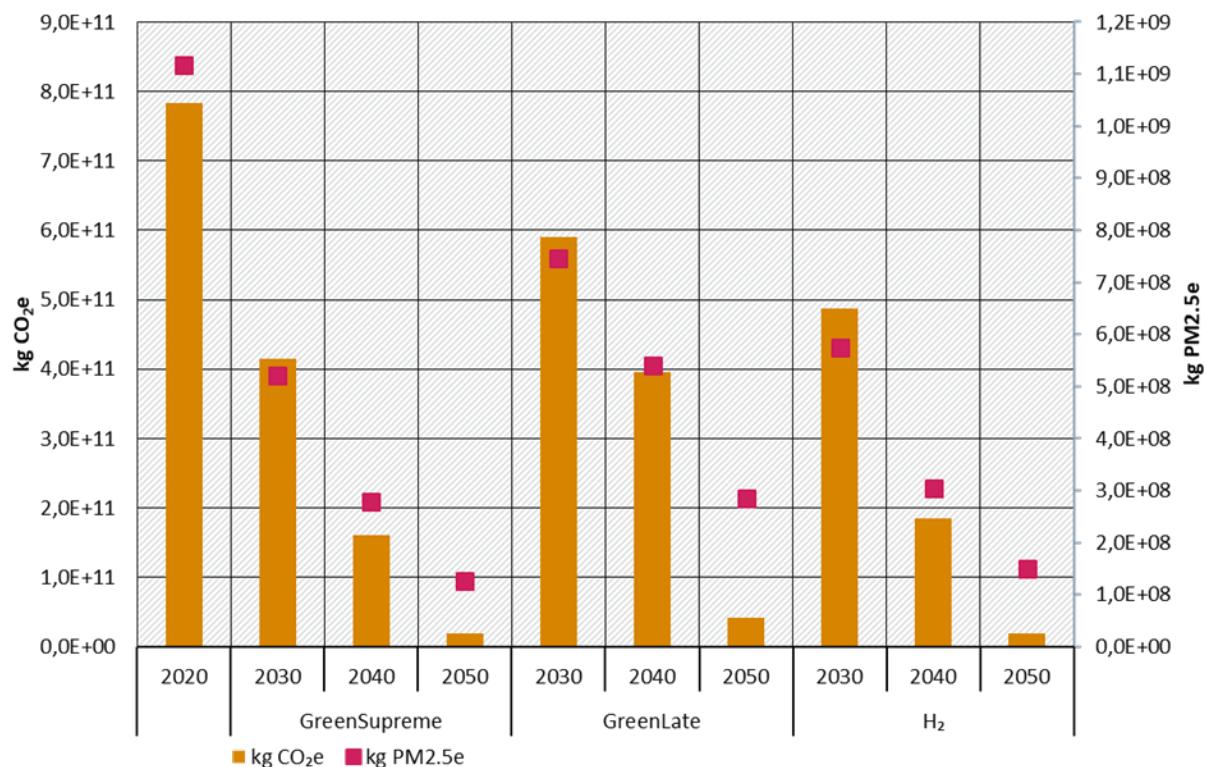
Die Berechnungsgrundlage hierzu fußt auf einem Ökobilanzmodell, welches ecoinvent Datenbanken enthält und mit den Prozessen der drei REFINE-Szenarien und Regionen verknüpft ist. Die drei Transformationsszenarien beschreiben unterschiedliche Pfade für den Umstieg auf erneuerbare Energieträger bei einer gleichzeitigen Reduktion des Energieverbrauchs. In GreenSupreme ist die Transformationsgeschwindigkeit sehr ambitioniert – der Endenergiebedarf Deutschlands reduziert sich bis zum Jahr 2050 um 47 % im Vergleich zu 2020. Im Szenario GreenLate liegt die Reduktion bei 20 % und im H<sub>2</sub>-Szenario bei 24 %.

Im Ergebnis werden absolute Umweltwirkungen abgeleitet, die sich auf die jeweilige Menge und Zusammensetzung des absoluten Energiebedarfs in den Szenarien beziehen. Zudem werden auch Umweltwirkungen ausgewiesen, die im Ausland durch die Nutzung in Deutschland resultieren.

Abbildung 43 zeigt einen Auszug des REFINE Teilberichts Umweltwirkungen und illustriert die gesamten THG-Emissionen sowie die Feinstaubbelastung (PM2,5e) in Deutschland. Ausgangspunkt sind etwa 784 Mrd. kg CO<sub>2</sub>e und 1,12 Mio. kg PM2,5e Feinstaub im Jahr 2020. Darin sind sowohl die Emissionen umfasst, die in Deutschland anfallen, als auch Emissionen im Ausland, die durch den deutschen Bedarf verursacht werden. Bei den Feinstaubbelastungen ist bezeichnend, dass in 2020 nur ein geringer Anteil (ca. 6,5 % des PM2,5) direkt emittiert wird; der Großteil der Emissionen entsteht sekundär durch chemische Prozesse in der Atmosphäre, z.B. durch emittierte Stick- und Schwefeloxide von Kohlekraftwerken zur Stromerzeugung.

Die Darstellung bezieht sich auf die Emissionen, die zur Bereitstellung des Endenergiebedarfs anfallen. Lachgas- und Methanemissionen aus der Landwirtschaft oder prozessbasierte Emissionen aus der Industrie sind in dieser Betrachtung nicht enthalten.

**Abbildung 43: Klimawandel (GWP100) und Feinstaubbelastung (PM2,5e) in Deutschland in den Szenarien**



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis (Dittrich et al. 2024b)

## 7.2 Ergebnisse Umweltkosten

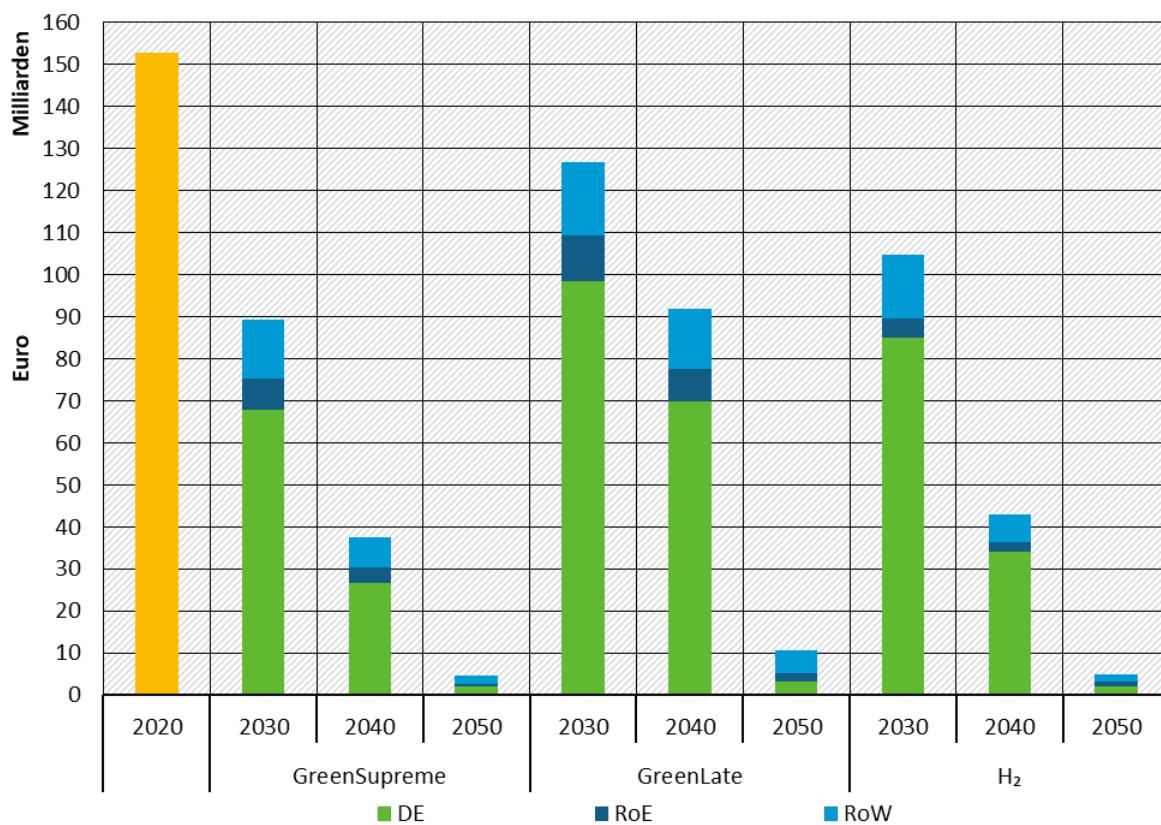
Die in Kapitel 7.1 erläuterten Kostensätze werden in Folge mit den gesamten Treibhausgasen für die Deckung des Endenergiebedarfs in Deutschland in den Transformationspfaden verrechnet. Die Differenzierung nach Szenarien zeigt, wie sich die Umweltkosten je nach Ambitionsniveau unterscheiden.

Abbildung 44 zeigt die Klimakosten Deutschlands zwischen 2020 und 2050 gemäß der 1 % Zeitpräferenzrate, d. h. wenn die Wohlfahrt heutiger Generationen höher gewichtet wird. Im Jahr 2020 liegen die Kosten auf Grundlage der 784 Mio. t Treibhausgase bei über 150 Mrd. € (bzw. 1.800 €/Person). Zur Einordnung: die Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen 2021 in Deutschland beliefen sich schätzungsweise auf etwa 40,5 Mrd. € (Trenczek et al. 2022).

Treibhausgasemissionen, die nicht direkt in Deutschland entstehen, sondern die durch Importe aus EU ohne DE (RoE) oder der Welt ohne EU (RoW) anfallen, werden mit den gleichen Umweltkosten verrechnet. Im Jahr 2030 liegen deren Anteile an den gesamten Umweltkosten bei 19 % im H<sub>2</sub>-Szenario, bei 22 % in GreenLate und bei 24 % in GreenSupreme. In 2050 ist über alle Szenarien hinweg eine Verschiebung der Umweltkosten in die Regionen außerhalb Deutschlands zu verzeichnen. Mit 56 % in GreenLate, 57 % in Green Supreme, und 70 % im H<sub>2</sub>-Szenario fallen die meisten Emissionen und damit Kosten durch Importe nach Deutschland an.

Deutlich wahrzunehmen ist, dass die absoluten Umweltkosten im Zeitverlauf trotz steigender spezifischer Klimakosten insgesamt in allen Szenarien deutlich sinken. Dies ist mit den (mehr oder weniger) ambitionierten Transformationspfaden hin zur Klima-/Treibhausgasneutralität zu erklären. Deutlich wird allerdings der enorme Umfang an Umweltkosten, die im Rahmen eines ambitionierten Transformationspfades vermieden werden können.

**Abbildung 44: Durch Deutschland verursachte Umweltkosten aufgrund von Treibhausgasemissionen differenziert nach Regionen und Szenarien gemäß 1 % reiner Zeitpräferenzrate in Euro**



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis (Matthey und Bünger 2020)

In GreenSupreme werden im Jahr 2030 im direkten Vergleich mit 2020 bereits etwa 64 Mrd. € an Umweltkosten vermieden. Im H<sub>2</sub>-Szenario sind es 48 Mrd. € und im GreenLate-Szenario noch 26 Mrd. €. Im Jahr 2040 wird die Differenz noch deutlicher: In GreenSupreme fallen lediglich 24 % der Umweltkosten von 2020 an, das entspricht einer Summe von 115 Mrd. €. Im H<sub>2</sub>-Szenario werden ebenfalls beachtliche 110 Mrd. € gegenüber 2020 vermieden. In GreenLate fällt die Vermeidung im Jahr 2040 aufgrund der zögerlichen Transformation deutlich geringer aus. Die Kosten liegen etwa 40 % geringer (-61 Mrd. €) und liegen damit knapp unter der in GreenSupreme bereits zehn Jahre zuvor erreichten Einsparung.

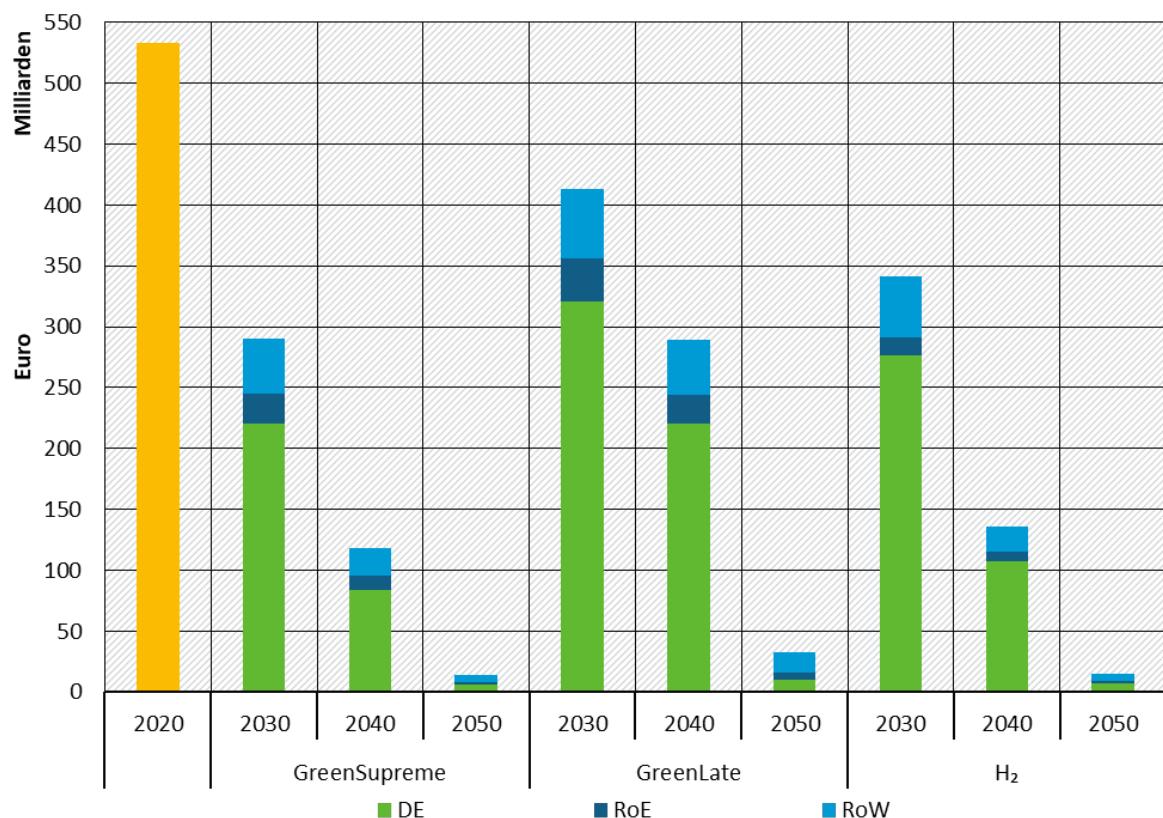
Im Jahr 2050 liegen die entstehenden Umweltkosten bei 5 Mrd. € in GreenSupreme und im H<sub>2</sub>-Szenario und bei etwa 10 Mrd. € in GreenLate. In allen drei Szenarien können die Klimakosten demnach gegenüber 2020 deutlich um 93-97 % gesenkt werden.

Es kann deutlich gezeigt werden, dass die Geschwindigkeit und das Ambitionsniveau des Transformationspfades einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der gesamten Umweltkosten haben. Die kumulierten Umweltkosten der drei Jahre 2030, 2040 und 2050 summieren sich in GreenSupreme auf 131 Mrd. €, im H<sub>2</sub>-Szenario auf 154 Mrd. € und in GreenLate auf 229 Mrd. €. Der Wohlfahrtsschaden für die Gesellschaft fällt im GreenSupreme-Szenario (nur für die drei Stützjahre berechnet) damit knapp 100 Mrd. € niedriger aus als in GreenLate. Auch im H<sub>2</sub>-Szenario entsteht ein um 77 Mrd. € niedrigerer gesellschaftlicher Schaden als im GreenLate-Szenario.

Daraus kann das klare Fazit gezogen werden, dass eine ambitionierte Umweltpolitik die Umweltkosten deutlich senkt und damit die Gesellschaft heute und in Zukunft entlasten kann.

Gleichzeitig ist die Abwägung, welches gesellschaftliche Wohl stärker gewichtet wird – das jetziger oder das künftiger Generationen – bedeutsam für die Höhe der Umweltkosten. In Abbildung 45 sind die in Deutschland verursachten Umweltkosten durch Treibhausgasemissionen nach der 0 % Zeitpräferenzrate abgebildet, was eine Gleichgewichtung der Wohlfahrt der Generationen widerspiegelt.

**Abbildung 45: Durch Deutschland verursachte Umweltkosten aufgrund von Treibhausgasemissionen differenziert nach Regionen und Szenarien gemäß 0 % reiner Zeitpräferenzrate in Euro**



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis (Matthey und Bünger 2020)

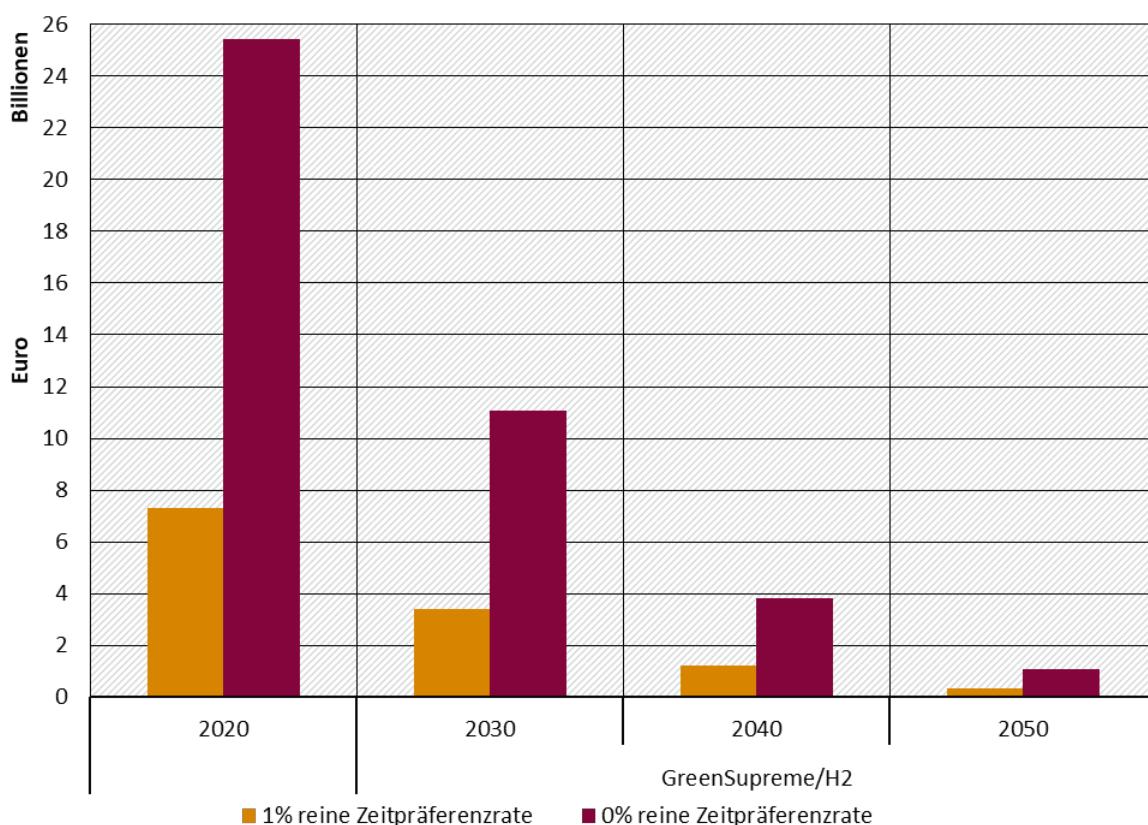
Die Gleichgewichtung der heutigen und zukünftigen Generationen führt dazu, dass die Umweltkosten im Jahr 2020 etwa 380 Mrd. € höher ausfallen als bei 1 % reiner Zeitpräferenzrate (siehe Abbildung 44). Die Klimaschäden im Jahr 2020 liegen bei einer halben Billion €, bzw. bei etwa 6.400 € pro Person.

Die prozentualen Einsparungen in den drei Szenarien fallen ähnlich aus wie in Abbildung 44. In absoluten Werten liegen diese aber deutlich höher. In GreenSupreme liegen die Klimakosten etwa 240 Mrd. € niedriger als im Jahr 2020. In GreenLate wird dieses Ausmaß der vermiedenen Kosten erst im Jahr 2040 erreicht.

Erneut zeigen die über drei Stützjahre aufsummierten Umweltkosten, dass die Umsetzungsgeschwindigkeit entscheidend ist, um die gesellschaftliche Wohlfahrt zu steigern. In GreenSupreme umfassen die Kosten in Deutschland in den Jahren 2030, 2040 und 2050 etwa 420 Mrd. €; im GreenLate-Szenario sind etwa 313 Mrd. € mehr Umweltkosten durch die Gesellschaft zu zahlen.

In ganz anderen Dimensionen bewegen sich die Schadenskosten, wenn die Empfehlungen der Umweltkostensätze auf die globalen Treibhausgasemissionen übertragen werden<sup>27</sup>. Abbildung 46 zeigt die aktuellen Kosten im Jahr 2020 sowie die Kosten für das GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenario (beide basieren auf dem Teske 1,5°C Szenario, s. Kap. 3.4). Werden heutige Generationen höher gewichtet (1 % Zeitpräferenzrate) belaufen sich die 37,4 Mrd. t CO<sub>2</sub>e im Jahr 2020 auf Klimakosten von 7,3 Billionen €. Werden heutige und zukünftige Generationen ausgewogen bewertet, steigen die Umweltkosten schätzungsweise auf 25 Billionen € und liegen damit auf dem gleichen Niveau wie das BIP der USA. (Länderdaten.info 2023)

**Abbildung 46: Global verursachte Umweltkosten durch Treibhausgasemissionen gemäß 0 % und 1 % reiner Zeitpräferenzrate in Euro**



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis (Matthey und Bünger 2020)

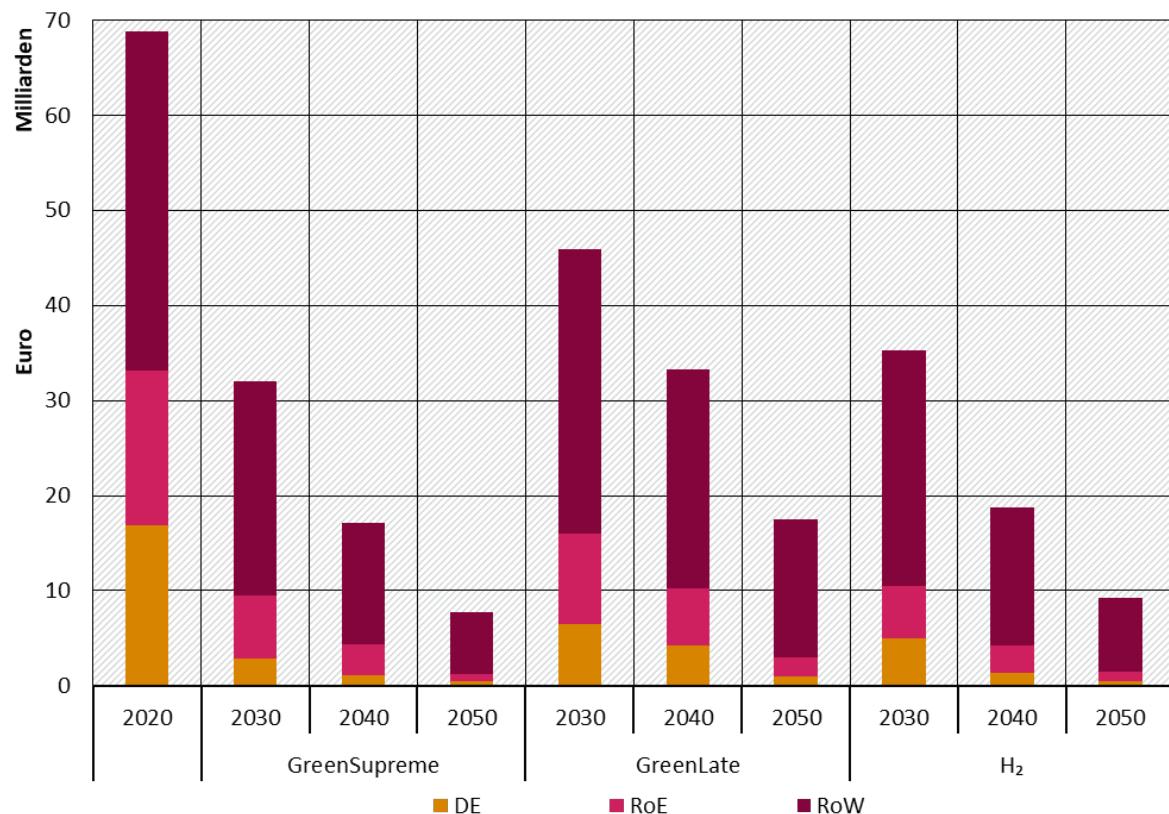
Durch die global verminderten Treibhausgasemissionen im GreenSupreme- und H<sub>2</sub>-Szenario fallen die Kosten für gesellschaftliche Schäden bereits in 2030 um über die Hälfte geringer aus. Nach der 1 % Zeitpräferenzrate liegen diese bei 11 Billionen €, nach der 0 % Zeitpräferenzrate bei 3,4 Billionen €; das sind bei einer Weltbevölkerung von 8,5 Mrd. Menschen im Jahr 2040 etwa 400 € bzw. 1.300 € pro Person.

Die Wohlfahrt heutiger und künftiger Generationen wird nicht allein durch die Emission von Treibhausgasen negativ beeinträchtigt, sondern durch eine ganze Reihe weiterer Umweltwirkungen, wie etwa Feinstaubbelastungen (siehe weitere Ausführungen im REFINE Teilbericht Umweltwirkungen (Dittrich et al. 2024b)). Die derzeitigen gesellschaftlichen Kosten der Feinstaubbelastung (PM2,5) belaufen sich auf knapp 70 Mrd. €. Bezeichnend ist, dass

<sup>27</sup> Bei der Übertragung der (deutschen) Kostensätze auf andere Regionen der Welt werden die Schäden so bewertet, als hätten Klimafolgen für arme und reiche Menschen die gleichen Wohlfahrtsverluste zur Folge. Das sog. „Equity Weighting“. (Matthey und Bünger 2020)

lediglich ein Viertel der durch Deutschland verursachten Feinstaubbelastung (Partikel mit aerodynamischem Durchmesser  $<2,5 \mu\text{m}$ ) in 2020 auf deutschem Terrain anfällt; der Großteil der Belastungen und damit der Gesundheitsschäden fällt außerhalb Europas an (siehe Abbildung 47).

**Abbildung 47: Durch Deutschland verursachte Umweltkosten der Feinstaubbelastung (PM2,5) differenziert nach Region in Euro**



Quelle: Eigene Darstellung ifeu auf Basis (Matthey und Bünger 2020)

Wie schon anhand der Klimakosten gezeigt wurde, gilt auch für die Umweltkosten durch Feinstaubemissionen, dass der Pfad der Transformation entscheidend dafür ist, wie hoch die durch die Gesellschaft zu tragenden (Gesundheits-)Schäden ausfallen. Im H<sub>2</sub>-Szenario gelingt im Jahr 2030 eine Halbierung der Umweltkosten; noch deutlicher ist die Reduzierung im GreenSupreme-Szenario im selben Jahr (-54 %). In GreenLate liegen die Umweltkosten im Jahr 2030 vergleichsweise noch etwa 11-14 Mrd. € höher. Weiterhin fällt der Großteil der Kosten, die durch gesundheitliche Schäden entstehen, im Ausland an.

Die Umweltkosten sind auch im Zieljahr 2050 noch erheblich. In GreenLate belaufen sich diese weiterhin auf etwa 17,5 Mrd. €. Im GreenSupreme- und im H<sub>2</sub>-Szenario unterschreiten die Kosten immerhin die 10 Mrd. € Marke. Etwa 95 % der Umweltkosten betreffen zudem Regionen außerhalb Deutschlands.

Die Quantifizierung der Klima- und Umweltkosten verdeutlicht durch Abschätzung der „vermiedenen“ Kosten nicht nur den Nutzen einer ambitionierten Umweltpolitik, sondern zeigt durch eine nach Regionen differenzierte Betrachtung auch auf, welcher gesellschaftliche Schaden durch den deutschen Bedarf im Ausland verursacht wird.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Die Forschungsfragen, die im Projekt REFINE in Bezug auf die Rohstoffbedarfe der deutschen Energiewende formuliert wurden, konnten sehr fundiert untersucht und beantwortet werden.

Die Ergebnisse zu Umweltwirkungen der deutschen Energiewende werden im Teilbericht Umweltwirkungen detailliert analysiert und beschrieben (Dittrich et al. 2024b). Dort werden u. a. die mit der Transformation verbundenen Treibhausgasemissionen und weitere Umweltwirkungen (u.a. Frischwasserbedarf, Feinstaub, Versauerung, Eutrophierung) analysiert und nach Regionen und Schlüsseltechnologien differenziert abgebildet. Der vorliegende Bericht hingegen legt den Schwerpunkt auf den Rohstoffbedarf. Darüber hinaus werden mit den Umweltkosten auch gesamtökonomische Aspekte adressiert.

Dazu wurden zwei verschiedene methodische Ansätze angewendet und weiterentwickelt. Zur Abschätzung des **gesamtökonomischen Rohstoffbedarfs** (Top-down-Analyse) wurde das umweltökonomische Modell URMOD, das noch im Vorhaben RESCUE (2015-2019) genutzt wurde, zu einem multiregionalen Modell (URMOD-3R) weiterentwickelt. Parallel dazu wurden zur Untersuchung der Umweltwirkungen und der Rohstoff- bzw. Materialbedarfe für die Energiewende ein **prospektives Ökobilanzmodell** entwickelt (siehe (Dittrich et al. 2024b)). Für die Abschätzung der Rohstoffbedarfe wurden die dabei angepassten ecoinvent Datensätze gesondert ausgewertet (siehe Kapitel 6). Mit beiden methodischen Ansätzen wurde abgeschätzt, welche Rohstoffaufwendungen bei Übertragung einer deutschen Energiewende auf globale Ebene entstehen und wie sich der Rohstoffbedarf Deutschlands für ausgewählte Rohstoffe verändert. Zudem wurde anhand heutiger Förder- und Produktionsmengen eine Abschätzung vorgenommen, welche Mehrbedarfe entstehen können.

Die Weiterentwicklung des Modells URMOD zu einem **multiregionalen Modell URMOD-3R** ermöglicht die Ausweisung des Rohstoffkonsums (RMC) für die drei Regionen Deutschland, Europa ohne Deutschland (EU ohne DE) und die Welt ohne Europa (Welt ohne EU) für die drei ausgewählten Szenarien und alle Stützjahre. Die methodische Weiterentwicklung umfasste u. a. eine gezielte Ausweitung der Input-Output-Tabellen (IOT) für die vertieft untersuchten Schlüsseltechnologien sowie für bestimmte Rohstoffe und ausgewählte Industriebranchen.

Die Auswertungen auf Basis des prospektiven Ökobilanzmodells wurden in diesem Bericht genutzt, um die Rohstoff- und Materialbedarfe der Schlüsseltechnologien abzuschätzen (Kap. 6). Die Ergebnisse zu Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffen der Energiebereitstellung basierend auf dem Ökobilanzmodell (Teilbericht Umweltwirkungen) wurden zur Einschätzung der mit den Emissionen verbundenen Umweltkosten verwendet (Kap. 7).

Die ermittelten Ergebnisse sind nachfolgend zunächst für die Top-down-Berechnung aus URMOD-3R und anschließend für die Auswertung auf Basis der angepassten ecoinvent Datensätze zusammengefasst. Daran schließt sich eine Zusammenfassung der Auswertungen zu Umweltkosten sowie ein Fazit zu den Forschungsergebnissen und zum weiteren Forschungsbedarf an.

### Rohstoffbedarf gesamtökonomisch (URMOD-3R)

Mit dem multiregionalen Ressourcenmodell URMOD-3R kann die gesamtökonomische Nutzung von primären und sekundären Ressourcen umfassend und konsistent aus Sicht der Endnachfrage dargestellt werden. Durch die Weiterentwicklung können neben dem Primärrohstoffkonsum auch Energieressourcen und Sekundärressourcen explizit abgebildet werden. Die Ergebnisse wurden für die drei Regionen Deutschland, EU ohne Deutschland und Welt ohne EU und die drei Szenarien (GreenSupreme, GreenLate und H<sub>2</sub>-Szenario) ermittelt.

Der globale Primärrohstoffkonsum im GreenSupreme-Szenario erreicht im Jahr 2050 rund 121 Mrd. t RME und liegt damit etwa 55 % über dem weltweiten Konsum im Jahr 2010 (78,4 Mrd. t RME).

Deutschland hat im Zieljahr 2050 einen Anteil von 0,5 % am globalen RMC (624 Mio. t RME), die EU ohne DE hat einen Anteil von 4 % (5,43 Mrd. t RME), in der Welt ohne EU beläuft sich der Primärrohstoffkonsum auf 116 Mrd. t RME. Bemerkenswert ist, dass der **deutsche Anteil** am globalen Ressourcenbedarf im Jahr 2050 deutlich **niedriger** ist als der Anteil Deutschlands an der weltweiten Bevölkerung und an der Wirtschaftsleistung. Dies ist eine klare Umkehr zu den Verhältnissen im Jahr 2010, in welchem Deutschland noch einen überproportionalen Anteil am Rohstoffbedarf aufweist.

Bei den wirtschaftlichen Wachstumsannahmen wird von einer Annäherung der Wirtschaftsleistung zwischen den verschiedenen Regionen ausgegangen. Es zeigt sich, dass die wirtschaftliche Entwicklung ein entscheidender **Treiber** für den Rohstoffkonsum bleibt trotz einer ambitionierten Energiewende, dem Heben von Materialeffizienzpotenzialen und einem hohen Einsatz von Sekundärressourcen.

Die Nutzung **fossiler Energieträger** geht in allen Szenarien den Szenarioannahmen folgend bis spätestens ins Jahr 2050 auf **null** zurück. Fossile Energieträger werden in allen Regionen vollständig durch erneuerbare Energien substituiert. Gleichzeitig sinkt die Nutzung von Energieressourcen insgesamt mit einem Rückgang von 56 % sehr deutlich trotz wachsender Wirtschaftsleistung in den Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU.

Recycling ist ein **zentraler Hebel** für die Reduktion des Primärrohstoffkonsums. 2050 werden weltweit Sekundärmetalle in Höhe von 1,44 Mrd. t Metallgehalt eingesetzt. Damit können 38,8 % des gesamten Metallbedarfs (in t Metallgehalt) gedeckt werden. Dies ist ein Anstieg um gut 10 Prozentpunkte im Vergleich zu 2010; 2010 wurden 28,5 % des Metallbedarfs für Sekundärmetalle gedeckt.

Aufgrund der dynamischen Zunahme der installierten Kapazitäten für diverse Schlüsseltechnologien in den Transformationspfaden, vervielfachen sich die **Rohstoffaufwendungen für die Investitionen** in diese gegenüber 2010. Eine vielleicht überraschende Erkenntnis ist, dass der Anteil am gesamten weltweiten Rohstoffaufwand mit 1,3-1,6 % überschaubar bleibt. Der Bedarf wird aber deutlich von den Metallen dominiert, was sich in einem höheren Anteil für die Metalle widerspiegelt: Im Weltmaßstab beanspruchen die Schlüsseltechnologien rund 13 % des gesamten Metallbedarfs.

#### **Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien auf Basis der angepassten ecoinvent Datensätze**

Die auf dem Bottom-up-Ansatz basierende Auswertungen der Rohstoffaufwendungen für die Schlüsseltechnologien liefern für die drei Szenarien, Regionen und Stützjahre umfassende Ergebnisse. Die Differenzierung nach (bis zu 15) Rohstoffkategorien erlaubt einen detaillierten Einblick in Materialbedarfe je Transformationspfad.

Es wird gezeigt, dass der Rohstoffaufwand, der mit dem Zubau der Schlüsseltechnologien einhergeht, konstant ansteigt. Im Jahr 2030 variiert der weltweite Rohstoffbedarf je nach Szenario noch zwischen 252 Mio. t und 358 Mio. t. Im Zieljahr 2050 wird eine Spanne von 907 Mio. t und 1.084 Mio. t erreicht. Das GreenSupreme-Szenario präsentiert sich in diesem Jahr als der Transformationspfad mit dem **geringsten Rohstoffbedarf**.

Die Rohstoffbedarfe in den Szenarien variieren im Zeitverlauf. Global fällt der Rohstoffbedarf in 2030 zunächst im GreenLate-Szenario am geringsten aus (252 Mio. t), was sich mit dem vergleichsweise geringeren **Ambitionsgrad** im Hinblick auf eine schnelle Umsetzung der

Transformation erklären lässt. Im gleichen Jahr liegt der Bedarf im H<sub>2</sub>-Szenario am höchsten (358 Mio. t). Auch im Jahr 2040 ist der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario noch am höchsten (791 Mio. t). Der Bedarf im GreenLate-Szenario (633 Mio. t) nähert sich deutlich an den Bedarf des GreenSupreme-Szenarios (687 Mio. t) an. Im Jahr 2050 fällt wiederum der Rohstoffbedarf im H<sub>2</sub>-Szenario mit 1.084 Mio. t am höchsten aus. Nur minimal darunter liegt das GreenLate-Szenario (1.058 Mio. t), bedingt durch die Notwendigkeit die langsame Transformation aufzuholen und da bereits ein Großteil der Anlagen ersetzt werden muss. Die schnelle Umsetzung im GreenSupreme-Szenario zahlt sich mit dem geringsten Bedarf im Jahr 2050 aus (907 Mio. t).

**Fünf Schlüsseltechnologien** dominieren den Rohstoffbedarf. Den größten Anteil nehmen die Onshore-Windenergieanlagen ein (52-63% je nach Szenario und Jahr), gefolgt von der solarthermischen Kraftwerkstechnologie der Parabolrinnen (9-18 %), PV-Dachanlagen (3-17 %), der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung (3-18 %), PV-Freilandanlagen (3-8 %) und Offshore-Windenergieanlagen (3-4 %). Alle weiteren Schlüsseltechnologien haben einen Anteil von 2 % oder geringer.

Der Blick auf Rohstoffe über alle Technologien (und Regionen, Szenarien und Jahre) hinweg zeigt eine Dominanz der nicht-metallischen Rohstoffbedarfe von Sand und Kies (33-43 %), sowie Zement und Beton (24-32 %). Bei den Metallen dominiert der Eisen- und Stahlbedarf (14-17 %), gefolgt von Aluminium (3-6 %) und Kupfer (rund 1 %).

Die Auswertungen nach Konsumperspektive und Produktionsortsperspektive verdeutlicht klar die hohe Bedeutung und Rolle der Importe für Deutschland und auch der EU ohne DE. Die Betrachtung des tatsächlichen Konsums zeigt einen deutlich höheren Rohstoffbedarf als bei alleiniger Berücksichtigung des Produktionsortes Deutschland.

Für die vier **PtX-Energieträger** – Wasserstoff, PtG-Methan, PtL-Methanol und Fischer-Tropsch-(FT-) Kraftstoffe – sind sowohl Deutschland als auch die EU ohne DE auf **Importe** (weitestgehend) aus der Welt ohne EU angewiesen, um den Bedarf zu decken. Wasserstoff wird dabei ausschließlich im H<sub>2</sub>-Szenario von Deutschland (zusätzlich) direkt importiert. Abgesehen davon, wird es als Zwischenprodukt für daraus hergestellte importierte PtX-Produkte (PtL, PtG, FT) benötigt. Im GreenLate-Szenario fallen die Rohstoffaufwendungen dafür für Deutschland besonders deutlich aus. Im Jahr 2050 werden etwa 612 kt Rohstoffe für die H<sub>2</sub>-Bereitstellung als Zwischenprodukt benötigt, die durch den deutschen PtX-Import in der Welt ohne EU anfallen. Für die PtL-Methanolsynthese sind es 61 kt Rohstoffe, 40 kt Rohstoffe für FT-Kraftstoffe sowie 41 kt Rohstoffe für PtG-Methan. In der EU ohne Deutschland fallen die Rohstoffaufwendungen für PtX-Importe ebenfalls im Jahr 2050 am höchsten aus; für das GreenLate-Szenario werden etwa 661 kt für die H<sub>2</sub>-Bereitstellung als Zwischenprodukt, 132 kt Rohstoffe für die PtL-Methanolsynthese sowie weitere 22 kt Rohstoffaufwendungen für FT-Kraftstoffe in der Welt ohne EU benötigt, um die entsprechende Nachfrage in der EU ohne Deutschland zu decken.

In Relation zu heutigen Produktionsmengen (2022) übersteigt keiner der ermittelten und ausgewerteten Rohstoffbedarfe für (ausschließlich) Schlüsseltechnologien derzeitige **Produktionsniveaus**. Allerdings nimmt insbesondere Aluminium einen bemerkenswerten Anteil von 60 % im H<sub>2</sub>-Szenario und 63 % im GreenLate-Szenario ein; Kupfer und sonstige Metalle nehmen einen Anteil von 26 % bzw. 46 % im Jahr 2050 im H<sub>2</sub>-Szenario ein. Eisen und Stahl variieren je nach Jahr und Szenario zwischen 2-10 %. Kunststoffe nehmen zwischen 1-4 % und Sande und Kies zwischen 1-2 % aktueller Produktionsmengen ein. Diese Anteile zeigen insbesondere für Kupfer und Aluminium, dass es hier zu **Konflikten** mit anderen

Rohstoffnachfragen anderer Sektoren kommen kann und eine **Steigerung der Fördermengen** relevant wird. Vor diesem Hintergrund und den damit möglicherweise steigenden Umweltbelastungen nimmt die Dringlichkeit zur Umsetzung weiterer Rohstoffeinsparungen weiter zu.

### **Umweltkosten der Transformationspfade**

Die bisherigen Analysen zum Rohstoffbedarf ermöglichen einen Blick darauf, in welchen Transformationsszenarien mehr oder weniger Rohstoffe bzw. Materialien benötigt werden. An diesen Kontext schließt sich die Frage an, welche Folgen ein entsprechendes „Mehr“ oder „Weniger“ dieser Rohstoffbedarf bewirkt. Die Rohstoffentnahme führt zu Umweltbelastungen, welche monetäre Schäden, beispielsweise in Form von Ernteausfällen, Schäden an Ökosystemen oder umweltbedingten Gesundheits- und Materialschäden zur Folge haben. Jedes Kilogramm emittierter Treibhausgase oder Luftschaadstoffe führt damit zu Kosten für die heutige und auch zukünftige Gesellschaft und deren Wohlfahrt. Vor diesem Hintergrund wurden im Projekt ausgewählte Umweltkosten der verschiedenen Transformationspfade ermittelt. Hierzu wurden auf Basis der in (Dittrich et al. 2024b) berechneten Umweltwirkungen für den Endenergiebedarf der drei Szenarien die **gesellschaftlichen Kosten** der Treibhausgasemissionen, sowie der Feinstaubbelastung (als Beispiel für ein Emittent der Luftverschmutzung) abgeleitet. Als methodische Datengrundlage wurden die Empfehlungen des Umweltbundesamts zu Umweltkostensätzen (Matthey und Bünger 2020) genutzt.

Gegenwärtig belaufen sich die Umweltkosten durch Treibhausgasemissionen, die durch den Endenergiebedarf Deutschlands im Jahr 2020 verursacht werden auf 150 Mrd. €. Das ist mehr als das Dreifache des Schadenswerts, der 2021 durch die Sturzfluten und Überschwemmungen in der Region um das Ahrtal entstanden ist (Trenczek et al. 2022). Wird eine intergenerationale Gerechtigkeit vorausgesetzt und daher die **Wohlfahrt zukünftiger Generationen** gleich wie die der heutigen Generationen bewertet, dann belaufen sich die aktuellen Klimakosten auf 530 Mrd. €.

Die Entwicklung der Umweltkosten über die Stützjahre zeigt deutlich den **monetären Nutzen** eines ambitionierten Transformationspfades gegenüber einer zögerlichen Entwicklung. Im ambitionierten GreenSupreme-Szenario werden durch die zügige Verminderung der Treibhausgasemissionen bereits in 2030 Kosten in Höhe von 64 Mrd. € vermieden und damit eine Verminderung um 40 % gegenüber 2020 erzielt. Im H<sub>2</sub>- und im GreenLate-Szenario liegt die Vermeidung dagegen nur bei 48 Mrd. € bzw. 26 Mrd. €.

Durch den deutschen Verbrauch von Energie entstehen nicht nur in Deutschland selbst, sondern in großem Maße auch im Ausland Umweltwirkungen. Die Quantifizierung der Kosten, etwa in Form von Gesundheitsschäden durch die Feinstaubbelastung, verdeutlicht, welche Verantwortung Deutschland gegenüber Gesellschaften außerhalb der eigenen Landesgrenze hat und welche gesellschaftlichen Folgen bzw. Kosten durch unterschiedliche Transformationspfade außerhalb der innerdeutschen Grenze ausgelöst werden. Zudem liefert der hohe monetäre Nutzen einer ambitionierten Umweltpolitik für die Gesellschaft ein wichtiges **Argument für umfangreiche Investitionen** in diese. Dieser Nutzen steigt bei Gleichgewichtung der Wohlfahrten heutiger und zukünftiger Generationen noch weiter an.

### **Methodische Einschränkungen**

Bei allen Ergebnissen in diesem Bericht handelt es sich um Modellierungsergebnisse, die grundsätzlich auf Annahmen zur Schließung von Datenlücken angewiesen und daher immer mit Unsicherheiten behaftet sind.

- ▶ Die Abschätzung der Rohstoffbedarfe für die Schlüsseltechnologien ist mit Datenunsicherheiten verbunden. Für die Auswertung der angepassten ecoinvent-Datensätze musste aus der sehr umfangreichen Materialliste von ecoinvent eine Auswahl der zu analysierenden Materialien getroffen werden. Auch für die Hochrechnungen auf absolute Bedarfe mussten teils Anpassungen vorgenommen werden aufgrund der unterschiedlichen Szenarienarrative für die Regionen (RESCUE, H<sub>2</sub>-Langfristszenario, 1,5 und 2°-Szenario). Daher sind die Abschätzungen mit Unsicherheiten behaftet, sie können aber als richtungssicher eingeschätzt werden.
- ▶ Die Substitution einzelner besonders kritischer Rohstoffe durch alternative Rohstoffe konnte bei der Abschätzung der Rohstoffbedarfe nicht betrachtet werden.
- ▶ Die Annahmen zu den Szenarien GreenLate und GreenSupreme wurden größtenteils aus den Modellierungen von RESCUE und der dort verwendeten Version von URMOD übertragen. Da URMOD-3R aber eine tiefere Gliederung aufweist, musste auf Schätzungen zurückgegriffen werden, um die vollständige Gliederungstiefe zu erreichen.
- ▶ In diesem Projekt genutzte Recyclingquoten basieren teilweise auf unterschiedlichen Definitionen. In manchen Fällen ist es bei einzelnen Datenquellen nicht klar, ob die Quoten sich nur auf End-of-Life-Schrotte beziehen oder auch Produktionsabfälle beinhalten.

### **Fazit und Forschungsbedarf**

Die Forschungsarbeiten im Projekt REFINE erlauben eine umfassende Einschätzung des Rohstoffbedarfs für eine ambitionierte Transformation, sowohl in Deutschland als auch in den beiden anderen Regionen EU ohne DE und Welt ohne EU. Im Teilbericht Umweltwirkungen wurde der Rohstoffbedarf der Energiewende mit dem Indikator KRA aus der Ökobilanzsicht bewertet. In diesem Teilbericht wurde mit URMOD-3R eine gesamtökonomische Abschätzung des Ressourcenbedarfs vorgenommen. Der Bedarf isoliert für die Schlüsseltechnologien wurde mit einer materialbezogenen Auswertung der angepassten ecoinvent-Datensätzen abgeschätzt.

Folgende zentrale Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

- ▶ Mit einer ambitionierten Transformation kann in Deutschland der Primärrohstoffkonsum bis 2050 um 55 % auf 7,9 t RME pro Kopf reduziert werden. In der EU ohne DE geht der RMC pro Kopf langsamer zurück und liegt 2050 bei 13,1 t RME. In der Region Welt ohne EU besteht **Aufholbedarf** und der Primärrohstoffkonsum steigt auf 12,6 t RME pro Kopf bis 2050.
- ▶ Ein zentrales Ergebnis ist, dass der deutsche Anteil am globalen Ressourcenbedarf im Jahr 2050 deutlich niedriger ist als der Anteil Deutschlands an der weltweiten Bevölkerung und an der Wirtschaftsleistung. Dies ist eine deutliche **Umkehr** zu den Verhältnissen im Jahr 2010, in welchem Deutschland einen überproportionalen Anteil am Rohstoffbedarf aufweist.
- ▶ In den betrachteten Szenarien macht der **Rohstoffaufwand für die Schlüsseltechnologien** einen überschaubaren Anteil am Primärrohstoffkonsum aus und stellt damit **kein Hindernis** für eine ambitionierte und schnelle Umsetzung der Energiewende dar.
- ▶ Das ambitionierte **GreenSupreme-Szenario** ist für alle drei Betrachtungen das Szenario mit den niedrigsten Ressourcen- und Rohstoffaufwendungen und Umweltkosten in 2050. Insbesondere aus der Perspektive der Umweltkosten zeigt sich der gesellschaftliche Nutzen einer schnellen und umfassenden Transformation.

URMOD-3R wurde in REFINE umfassend weiterentwickelt. Durch die hohe Gütergruppengliederung, die Nutzung physischer Einheiten und der Betrachtung des globalen Rohstoffbedarfs in einem **geschlossenen Modell** konnte eine sehr hohe Zuverlässigkeit erreicht werden. Erstmals konnten Sekundärressourcen und Energieressourcen explizit im Modell abgebildet werden. Durch den Fokus auf drei Regionen konnten die Eingangsdaten umfassend validiert werden und damit eine sehr hohe Qualität der Daten erreicht werden, was einen großen Vorteil gegenüber gängigen multiregionalen Input-Output-Tabellen darstellt. Das Modell bietet einen großen Datenschatz, der in diesem Projekt nicht vollständig gehoben werden konnte, so sind beispielsweise auch Auswertungen auf Ebene einzelner Gütergruppen oder verschiedener Sektoren möglich. Zudem kann stärker herausgearbeitet werden, welche Auswirkungen die Szenarioannahmen etwa für den Konsum der privaten Haushalte oder Investitionen haben.

Die hohe Gütergruppengliederung und der Umfang des Modells stellen allerdings auch eine Herausforderung dar. So sind die Anforderung an die Ausgangsdaten sehr hoch und die Datenrecherche zur Befüllung der Input-Output-Tabellen für das Basisjahr und die Szenarien hat sich als sehr aufwändig erwiesen. Für zukünftige Projekte sehen wir daher folgende Möglichkeiten zur Fortführung und Weiterentwicklung des Modells:

- ▶ Aktuell bezieht sich das Modell auf das Basisjahr 2010. Das Basisjahr sollte für zukünftige Nutzungen aktualisiert werden und Szenarien sollten im Fünf- oder Zehnjahresabstand modelliert werden, damit auf neue politische Entwicklungen besser reagiert werden kann, wie beispielsweise auf die Änderung des Zieljahres für Treibhausgasneutralität auf 2045 nach dem Klimaschutzgesetz. So stellt sich beispielsweise die Frage, ob in diesem Zuge Informationen des deutschen Projektionsberichtes genutzt und einfließen können. Der Projektionsbericht (Harthan et al. 2023) spiegelt (u.a.) aktuell beschlossene politische Maßnahmen und Instrumente in verschiedenen Sektoren wieder und übersetzt diese in einen realitätsnahen Pfad der THG-Emissionsentwicklung für Deutschland.
- ▶ Gegenwärtig läuft das Modell in Excel. Es hat sich aber gezeigt, dass Excel bei den Berechnungen an klare Grenzen stößt. Für eine Nutzung und Weiterentwicklung müsste das Modell vermutlich in einer anderen performanteren Umgebung, wie Python oder R, implementiert werden.
- ▶ Um die Komplexität zu verringern, könnte die Gütergruppengliederung etwas reduziert werden. Der Nachweis erneuerbarer Energien und der Sekundärmetalleinsatz sollte beibehalten werden. Mit den jetzt durch REFINE gewonnenen Erkenntnissen könnte der gesonderte Nachweis von Schlüsseltechnologien und die damit einhergehende Gliederungstiefe bei den Investitionen wieder entfallen.

Ein Abgleich der Ergebnisse zwischen den beiden Modellierungsansätzen URMOD-3R (Top-down) und prospektive Ökobilanzmethode (Bottom-up) war im Projekt REFINE nicht vorgesehen. Eine vergleichende Betrachtung der beiden Ansätze und eine Erörterung möglicher **Synergien und Kombinationsmöglichkeiten** sehen wir daher als möglichen Ansatzpunkt für weitere Forschung. Die Prüfung, inwieweit eine Kombination oder Integration von bottom-up Elementen in URMOD-3R möglich ist, würde eine Grundlage zur Verknüpfung weiterer Umweltwirkungen bieten. Diese könnten weitergehend potenziell Aussagen zur Einhaltung oder Überschreitung planetarer Grenzen ermöglichen.

Für die Rohstoffauswertungen zu den Schlüsseltechnologien mittels der angepassten ecoinvent Datensätze wurde im Projektverlauf ein neuer **Lösungsansatz** entwickelt, indem für Primär- und Sekundärmetalle neue Informationsflüsse im Ökobilanzmodell ergänzt wurden. Die dadurch

mögliche direkte Auswertung kann effizienter und genauer erfolgen. Im Projekt konnte der Ansatz aufgrund der Beschränkung auf Metallrohstoffe noch nicht angewendet werden, gegebenenfalls ist aber auch eine Entwicklung für andere Rohstoffe und Materialgruppen möglich.

## 9 Quellenverzeichnis

- Albrecht, F. G.; König, D. H.; Baucks, N.; Dietrich, R.-U. (2017): A standardized methodology for the techno-economic evaluation of alternative fuels – A case study. In: *Fuel*. Vol. 194, S. 511–526 DOI: [10.1016/j.fuel.2016.12.003](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.003).
- Alomar, J. M. (2020): Ley que prohíbe productos desechables obligará a incluir un alto porcentaje de plástico reciclado en botellas y fortalecerá la retornabilidad. In: *País Circular*. <https://www.paiscircular.cl/industria/ley-que-prohibe-envases-de-un-solo-uso-obliga-a-incorporar-un-alto-porcentaje-de-material-reciclado-en-botellas-e-impulsa-retornabilidad/> (26.09.2023).
- American Chemistry Council (2021): Can We Tweak Our Laws to Help Plastics Recycling? In: *America's Plastic Makers*. <https://plasticmakers.org/can-we-tweak-our-laws-to-help-plastics-recycling/> (26.09.2023).
- BGS (2023): World mineral statistics data. <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html> (21.11.2023).
- BMWK (2023): Erneuerbare Energien in Zahlen Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2022. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (21.02.2024).
- Born, H.; Schimpf-Willenbrink, S.; Lange, H.; Bussmann, G.; Bracke, R. (2017): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends. Internationales GeothermieZentrum Bochum, Bochum. <https://docplayer.org/78079340-Analyse-des-deutschen-waermepumpenmarktes.html> (13.05.2023).
- British Geology Survey (2023): World Mineral Production 2017-2021. <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html> (06.09.2023).
- Budinis, S. (2022): Direct Air Capture. IEA. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture> (06.06.2023).
- Bundesministerium der Justiz (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist. <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html> (27.09.2023).
- Bundesnetzagentur (o.J.): Bundesnetzagentur - Presse - Zubau Erneuerbarer Energien 2023. [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240105\\_EEGZubau.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240105_EEGZubau.html) (21.02.2024).
- Bundesverband Geothermie (2022): Geothermie in Zahlen. <https://www.geothermie.de/aktuelles/geothermie-in-zahlen.html> (16.03.2023).
- Buyny, S.; Klink, S.; Lauber, U. (2009): Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators. Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung - Endbericht. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3781.pdf> (15.11.2023).
- Chen, R.; Kim, S.; Chang, Z.; Chen, R.; Kim, S.; Chang, Z. (2017): Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. In: *Redox - Principles and Advanced Applications*. IntechOpen. DOI: [10.5772/intechopen.68752](https://doi.org/10.5772/intechopen.68752).
- Comtrade (2023): UN Comtrade Database. <https://comtradeplus.un.org/> (16.05.2023).
- DERA (2019): DERA-Rohstoffliste 2019. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten - potenzielle Preis- und Lieferrisiken. DERA Rohstoffinformationen Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-40.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-40.pdf?__blob=publicationFile) (06.11.2023).

Destatis (2009): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Input-Output-Rechnung 2004.

[https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft\\_mods\\_00008518](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00008518) (21.11.2023).

Destatis (2013): Produzierendes Gewerbe. Material- und Wareneingangserhebung im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden.

[https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft\\_mods\\_00021937](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00021937) (21.11.2023).

Destatis (2019): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. Input-Output-Rechnung nach 12 Gütergruppen / Wirtschafts- und Produktionsbereichen. 2015 (Revision 2014, Stand: August 2018).

[https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft\\_mods\\_00137826](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEHeft_mods_00137826) (21.11.2023).

Destatis (2022): Statistischer Bericht - 15. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung Deutschland 2021 bis 2070 (Variante 01, Geburten und LE moderat, WS niedrig (G2L2W1). Wiesbaden.

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Publikationen/Downloads-Vorausberechnung/statistischer-bericht-bvb-deutschland-2070-5124202219005.html?nn=208696> (29.09.2023).

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K.; Fehrenbach, H.; Ewers, B.; Gerhardt, N.; Becker, S.; Böttger, D.; Frischmuth, F.; Schoer, K. (2020a): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Vergleich der Szenarien Abschlussbericht.

UBA Climate Change 01/2020

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020\\_12\\_28\\_cc\\_06-2020\\_endbericht\\_vergleich\\_szenarien.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_06-2020_endbericht_vergleich_szenarien.pdf) (20.02.2024).

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K.; Fehrenbach, H.; Ewers, B.; Limberger, S. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. Abschlussbericht. UBA Climate Change 01/2020

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/transformationsprozess-treibhausgasneutrales-ressourcenschonendes-deutschland-greenee> (22.03.2023).

Dittrich, M.; Ewers, B.; Limberger, S.; Petri, F.; Vogt, R.; Doppelmayr, A.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K.; Liebich, A.; Münter, D.; Rosental, M.; Fröhlich, T.; Ludmann, S. (2024a): REFINE (Rohstoffe): Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Teilbericht Rohstoffe. *Noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024.*

Dittrich, M.; 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](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_05-2020_endbericht_greensupreme.pdf) (12.11.2020).

Dittrich, M.; 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](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_02-2020_endbericht_greenlate.pdf) (12.11.2020).

Dittrich, M.; Kämper, C.; Ludmann, S.; Ewers, B.; Giegrich, J.; Sartorius, C.; Hummen, T.; Marscheider-Weidemann, F.; Schoer, K. (2018): Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess). Texte29/2018 Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strukturelle-produktionstechnische-determinanten> (15.11.2023).

Dittrich, M.; Liebich, A.; Vogt, R.; Münter, D.; Wingenbach, C.; Ludmann, S.; Rosental, M.; Fröhlich, T.; Petri, F.; Ewers, B.; Doppelmayr, A.; Limberger, S.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K. (2024b): REFINE (Umwelt): Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Teilbericht Umweltwirkungen. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. *Noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024.*

Dittrich, M.; Liebich, A.; Vogt, R.; Münter, D.; Wingenbach, C.; Ludmann, S.; Rosental, M.; Fröhlich, T.; Petri, F.; Ewers, B.; Doppelmayr, A.; Limberger, S.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K. (2024c): REFINE: Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Anhang Steckbriefe Schlüsseltechnologien. *Noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024.*

EAT-Lancet Commission (2019): EAT-Lancet Commission Summary Report.  
[https://eatforum.org/content/uploads/2019/07/EAT-Lancet\\_Commission\\_Summary\\_Report.pdf](https://eatforum.org/content/uploads/2019/07/EAT-Lancet_Commission_Summary_Report.pdf) (28.09.2023).

Enkhhardt, S. (2024): BSW-Solar: Mehr als eine Million Photovoltaik- und Solarthermieanlagen 2023 installiert. In: *pv magazine Deutschland*. <https://www.pv-magazine.de/2024/01/02/bsw-solar-mehr-als-eine-million-photovoltaik-und-solarthermieanlagen-2023-installiert/> (21.02.2024).

European Aggregates Association (2022): Annual review 2019-2020.  
[https://uepg.testurl.fr/mediatheque/media/UEPG-AR20192020\\_V13\\_\(03082020\)\\_spreads.pdf](https://uepg.testurl.fr/mediatheque/media/UEPG-AR20192020_V13_(03082020)_spreads.pdf) (28.09.2023).

European Commission (2018): Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM%3A2018%3A28%3AFIN> (26.09.2023).

European Commission (2020a): Circular economy action plan.  
[https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en) (26.09.2023).

European Commission (2020b): Verpackungen und Verpackungsabfälle. <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/summary/packaging-and-packaging-waste.html> (26.09.2023).

European Commission (2022): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Verpackungen und Verpackungsabfälle, zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und der Richtlinie (EU) 2019/904 sowie zur Aufhebung der Richtlinie 94/62/EG. [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:de4f236d-7164-11ed-9887-01aa75ed71a1.0002.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:de4f236d-7164-11ed-9887-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF) (23.02.2024).

European Commission (2023a): EU Ecolabel Product Groups and Criteria.  
[https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home/product-groups-and-criteria\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/eu-ecolabel-home/product-groups-and-criteria_en) (26.09.2023).

European Commission (2023b): Critical raw materials. In: *Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en) (07.09.2023).

European Commission; Joint Research Centre; Alves Dias, P.; Pavel, C.; Plazzotta, B.; Carrara, S. (2020): Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Publications Office of the European Union, Luxemburg. DOI: 10.2760/160859  
<https://data.europa.eu/doi/10.2760/160859> (21.09.2023).

Eurostat (2023a): EU trade since 2002 by HS2-4-6 and CN8 (new content).  
<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ds-059322/legacyMultiFreq/table?lang=en> (11.11.2023).

- Eurostat (2023b): Annual detailed enterprise statistics for industry (NACE Rev. 2, B-E).  
[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sbs\\_na\\_ind\\_r2/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sbs_na_ind_r2/default/table?lang=en) (11.11.2023).
- Eurostat (2023c): Sold production, exports and imports. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/ds-056120> (11.11.2023).
- Eurostat (2023d): International trade in services (since 2010) (BPM6).  
[https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/bop\\_its6\\_det/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/bop_its6_det/default/table?lang=en) (16.11.2023).
- Eurostat (2023e): Final consumption expenditure of households by consumption purpose (COICOP 3 digit).  
[https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nama\\_10\\_co3\\_p3](https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nama_10_co3_p3) (16.11.2023).
- Eurostat (2023f): Cross-classification of gross fixed capital formation by industry and by asset (flows).  
[https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nama\\_10\\_nfa\\_fl](https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nama_10_nfa_fl) (11.11.2023).
- FAOSTAT (2023): Food and agriculture data. <https://www.fao.org/faostat/> (16.11.2023).
- Günnewig, D.; Johannwerner, E.; Metzger, J.; Kelm, T.; Wegner, N. (2022): Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen - Handlungsempfehlungen für die Regional- und Kommunalplanung. Umweltbundesamt.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba\\_umweltvertraegliche\\_standortsteuerung\\_von\\_solar-freiflaechenanlagen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_umweltvertraegliche_standortsteuerung_von_solar-freiflaechenanlagen.pdf) (15.09.2023).
- Hagelücken, C.; Schmidt, M.; Schebek, L.; Liedtke, C. (2023): Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy - Rahmenbedingungen, Anforderungen und Handlungsempfehlungen. Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU).  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023\\_uba\\_kom\\_ressourcen\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_uba_kom_ressourcen_bf.pdf) (14.09.2023).
- Harthan, R.; Förster, H.; Borkowski, K.; Böttcher, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Wiegmann, K.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jansen, L. L.; Jörß, W.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F. Chr.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Repenning, J.; Scheffler, M.; Steinbach, I.; Bei der Wieden, M.; Rohde, C.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Fuß, R.; Rock, J.; Osterburg, B.; Rüter, S.; Adam, S.; Dunger, K.; Rösemann, C.; Stümer, W.; Tiemeyer, B.; Vos, C. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. CLIMATE CHANGE 39/2023, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2023-fuer-deutschland> (14.02.2024).
- HELIOSCSP (2020): Concentrated solar power had a global total installed capacity of 6,451 MW in 2019. In: HELIOSCSP. <https://helioscsp.com/concentrated-solar-power-had-a-global-total-installed-capacity-of-6451-mw-in-2019/> (11.09.2023).
- Hutchinson, M.; Zhao, F. (2023): GWEC - Global Wind Report 2023. Global Wind Energy Council, Brussels.  
<https://gwec.net/globalwindreport2023/> (20.02.2024).
- IAI (2023): Global Aluminium Cycle 2020. AluCycle. <https://alucycle.world-aluminium.org/public-access/#global> (31.08.2023).
- ICA (2023): COPPER—THE PATHWAY TO NET ZERO. <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2023/03/ICA-GlobalDecar-202301-English-Final-singlepgs.pdf> (31.08.2023).
- IDA (2020): Desalination and Water Reuse by the Numbers. International Desalination Association. In: International Desalination and Reuse Association. <https://idadesal.org/> (18.06.2020).
- IEA (2020): Iron and Steel Technology Roadmap - Towards more sustainable steelmaking.  
[https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron\\_and\\_Steel\\_Technology\\_Roadmap.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf) (31.08.2023).

IEA (2022): World Energy Outlook 2022. Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> (29.09.2023).

IEA (2023a): World Energy Balances. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances#energy-balances> (21.11.2023).

IEA (2023b): Critical Minerals Data Explorer – Data Tools. In: IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer> (19.10.2023).

IRENA (2017): Geothermal Power: Technology Brief. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA\\_Geothermal\\_Power\\_2017.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Aug/IRENA_Geothermal_Power_2017.pdf) (16.03.2023).

IRENA (2023): Renewable power generation costs in 2022. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022> (20.02.2024).

Jones, E.; Qadir, M.; van Vliet, M. T. H.; Smakhtin, V.; Kang, S. (2019): The state of desalination and brine production: A global outlook. In: *Science of The Total Environment*. Vol. 657, S. 1343–1356 DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.12.076](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076).

Karlsdottir, M. R.; Heinonen, J.; Palsson, H.; Palsson, O. P. (2020): Life cycle assessment of a geothermal combined heat and power plant based on high temperature utilization. In: *Geothermics*. Vol. 84, S. 101727 DOI: [10.1016/j.geothermics.2019.101727](https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101727).

Kral, M.; Speth, D.; Gnann, T.; Wietschel, M. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenerien - Modul Verkehr. Consentec, Fraunhofer ISI, ifeu, TU Berlin, Karlsruhe. [https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3\\_Langbericht\\_Verkehr\\_final.pdf](https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_Langbericht_Verkehr_final.pdf) (30.05.2023).

Kurzweil, P. (2016): Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. Springer-Verlag, Wiesbaden. S. 78, 79, 196 <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14935-2> (18.09.2023).

Länderdaten.info (2023): Wirtschaft in den USA im Vergleich zur EU. In: *Laenderdaten.info*. <https://www.laenderdaten.info/Amerika/USA/wirtschaft.php> (16.11.2023).

Lenzen, M.; Moran, D.; Kanemoto, K.; Geschke, A. (2013): Building EORA: a global Multi-Regional Input-Output Database at high country and sector resolution. In: *Economic Systems Research*. Vol. 25, No. 1, S. 20–49 DOI: [10.1080/09535314.2013.769938](https://doi.org/10.1080/09535314.2013.769938).

Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Dünnebeil, F.; Knörr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F. G.; Pregger, T.; Schillings, C.; Moser, M.; Reißner, R.; Hosseiny, S.; Jungmeier, G.; Beermann, M.; Frieden, D.; Bird, N. (2020): Detailanalysen zum Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien - Anhang zum Abschlussbericht. TEXTE | 68/2020 Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/systemvergleich-speicherbarer-energietraeger-aus> (05.06.2023).

Liebich, A.; Müller, J.; Münter, D.; Wingenbach, C.; Vogt, R. (2023): LCAst – Prospektive Ökobilanzen auf Basis der ecoinvent-Datenbank. ifeu paper 03/23 Heidelberg.

[https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu\\_paper/ifeu\\_paper\\_3\\_2023\\_LCAst.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_paper/ifeu_paper_3_2023_LCAst.pdf).

Lux, B.; Sensfuß, F.; Kiefer, C.; Deac, G. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland Treibhausgasneutrale Hauptszenerien Modul Energieangebot. Karlsruhe. <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3-Langbericht-Energieangebot-final.pdf> (29.08.2023).

Mahlangu, N.; Thopil, G. A. (2018): Life cycle analysis of external costs of a parabolic trough Concentrated Solar Power plant. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 195, S. 32–43 DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.05.187](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.187).

- Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Kral, M.; Loibl, A.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L. A.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Maisel, F.; Marwede, M.; Rückschloss, J.; Tippner, M. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (16.10.2023).
- Matthey, A.; Bünger, B. (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze - Stand 12/2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21\\_methodenkonvention\\_3\\_1\\_kostensaetze.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf) (16.11.2023).
- Mehmeti, A.; McPhail, S. J.; Pumiglia, D.; Carlini, M. (2016): Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications. In: *Journal of Power Sources*. Vol. 325, S. 772–785 DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.078.
- Moulton, B. R.; Moses, K. (1997): Addressing the Quality Change Issue in the Consumer Price Index. *Economic Working Paper*, U.S. Bureau of Labor Statistics. <https://www.bls.gov/osmr/research-papers/1997/ec970080.htm> (16.11.2023).
- O'Brian, J. (2022): Global Aggregates, still growing despite strong headwinds. GAIN - Global Aggregates Information Network. <https://www.aggbusiness.com/feature/global-aggregates-demand-despite-strong-headwinds> (28.09.2023).
- OECD (2022): Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD. <https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm> (26.09.2023).
- OECD (2023a): Freight transport. [https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ITF\\_GOODS\\_TRANSPORT](https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=ITF_GOODS_TRANSPORT) (29.11.2023).
- OECD (2023b): National Accounts at a Glance. <https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=NAAG> (21.11.2023).
- OICA (2023): 2010 Production Statistics. In: *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers*. <https://www.oica.net/category/production-statistics/2010-statistics/> (16.11.2023).
- Plastics Europe (2022): Plastics - the Facts 2022. [https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2022/10/PE-PLASTICS-THE-FACTS\\_20221017.pdf](https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2022/10/PE-PLASTICS-THE-FACTS_20221017.pdf) (28.09.2023).
- Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE Studie. Climate Change Umweltbundesamt (UBA), Dessau. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue> (13.10.2020).
- Quaschning, V. (2019): Regenerative Energiesysteme: Technologie, Berechnung, Klimaschutz. Hanser, München.
- Quaschning, V. (2023): Weltweit installierte Photovoltaikleistung. In: *volker.quaschning.de*. <https://www.volker-quaschning.de/daterv/pv-welt/index.php> (26.09.2023).
- Römpp (2020): Meerwasserentsalzung. In: *Römpp-online*. <https://roempp.thieme.de> (04.09.2023).
- Schick, C.; Blesl, M.; Borggrefe, F.; Brand, H.; Buchmann, T.; Fahl, U.; Fuchs, A.-L.; Gils, H. C.; Hufendiek, K.; Münkel, A.; Püttner, A.; Rosenberg, M.; Scheben, H.; Scheele, R.; Schmidt, M.; Steurer, M.; Wetzel, M.; Wiesmeth, M. (2018): Energiesystemanalyse Baden-Württemberg. <http://www.strise.de/>

[fileadmin/user\\_upload/PDFs/Energiesystemanalyse\\_Baden-Wuerttemberg\\_Schlussbericht\\_Homepage.pdf](fileadmin/user_upload/PDFs/Energiesystemanalyse_Baden-Wuerttemberg_Schlussbericht_Homepage.pdf) (15.03.2023).

Schmidt, T.; Osterburg, B. (2013): Berichtsmodul Landwirtschaft und Umwelt in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen: Tabellenband für die Berichtsjahre 1991, 1995, 1999, 2003, 2007 und 2010. Thünen-Institut für Ländliche Räume, Sonstige.

[https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEMonografie\\_mods\\_00003772](https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DEMonografie_mods_00003772) (21.11.2023).

Schoer, K. (2006): Calculation of direct and indirect material inputs by type of raw material and economic activities. Federal Statistical Office Germany. Environmental-Economic Accounting (EEA), Wiesbaden.

[https://mdgs.un.org/unsd/envaccounting/ceea/archive/MFA/Raw\\_material\\_Germany.pdf](https://mdgs.un.org/unsd/envaccounting/ceea/archive/MFA/Raw_material_Germany.pdf) (15.11.2023).

Schoer, K.; Dittrich, M.; Ewers, B. (2018): Estimating raw material equivalents with multi-regional input-output models: the impact of sectoral disaggregation. ifeu Working Paper Heidelberg.

[https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu\\_Working\\_Paper\\_1.pdf](https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/ifeu_Working_Paper_1.pdf) (15.11.2023).

Schoer, K.; Dittrich, M.; Ewers, B.; Limberger, S.; Petri, F.; Doppelmayr, A. (2024a): Arbeitstitel: URMOD-3R - a MRIO-type scenario model for estimating the resource footprint for Germany, EU and the rest of the world. noch unveröffentlicht, voraussichtliche Veröffentlichung 2024.

Schoer, K.; Dittrich, M.; Kovanda, J.; Weinzettel, J.; Ewers, B.; Limberger, S.; Moll, S.; Baptista, N.; Bouwmeester, M. (2024b): Documentation of the EU RME model - February 2024. Eurostat.

<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/1798247/6874172/Documentation+of+the+EU+RME+model/> (14.02.2024).

Schoer, K.; Weinzettel, J.; Kovanda, J.; Giegrich, J.; Lauwigi, C. (2012): Raw Material Consumption of the European Union – Concept, Calculation Method, and Results. In: *Environmental Science & Technology*. Vol. 46, No. 16, S. 8903–8909 DOI: [10.1021/es300434c](https://doi.org/10.1021/es300434c).

Science Media Center Germany (2022): Kunststoffrecycling in Deutschland und der EU: Probleme und Lösungen. Science Media Center Germany gGmbH.

[https://www.sciencecenter.de/fileadmin/user\\_upload/Fact\\_Sheets\\_PDF/Kunststoffrecycling-in-Deutschland-und-der-EU\\_SMC-Factsheet\\_24112022.pdf](https://www.sciencecenter.de/fileadmin/user_upload/Fact_Sheets_PDF/Kunststoffrecycling-in-Deutschland-und-der-EU_SMC-Factsheet_24112022.pdf) (26.09.2023).

Sensfuß, F.; Lux, B.; Bernath, C.; Kiefer, C.; Pfluger, B.; Kleinschmitt, C.; Franke, K.; Deac, G.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Manz, P.; Neuwirth, M.; Wietschel, M.; Gnann, T.; Speth, D.; Krail, M.; Mellwig, P.; Blöhmer, S.; Tersteegen, B.; Maurer, C.; Ladermann, A.; Dröscher, T.; Willemse, S.; Müller-Kirchenbauer, J.; Giehl, J.; Hilaire, M.; Schöngart, S.; Kurre, A.; Hollnagel, J.; von Mikulicz-Radecki, F. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/> (26.04.2022).

Stadler, K.; Wood, R.; Bulavskaya, T.; Södersten, C.-J.; Simas, M.; Schmidt, S.; Usabiaga, A.; Acosta-Fernández, J.; Kuenen, J.; Bruckner, M.; Giljum, S.; Lutter, S.; Merciai, S.; Schmidt, J. H.; Theurl, M. C.; Plutzar, C.; Kastner, T.; Eisenmenger, N.; Erb, K.-H.; de Koning, A.; Tukker, A. (2018): EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. In: *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 22, No. 3, S. 502–515 DOI: [10.1111/jiec.12715](https://doi.org/10.1111/jiec.12715).

Teske, S.; Giurco, D.; Morris, T.; Nagrath, K.; Mey, F.; Briggs, C.; Dominish, E.; Florin, N.; Watari, T.; Mclellan, B.; Pregger, T.; Naegler, T.; Simon, S.; Pagenkopf, J.; Van den Adel, B.; Deniz, Ö.; Schmid, S.; Meinshausen, M.; Dooley, K. (2019): Achieving the Paris Climate Agreement Goals. Springer Link.

<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-05843-2> (29.08.2023).

Trenczek, J.; Lühr, O.; Eiserbeck, L.; Leuschner, V. (2022): Projektbericht „Kosten durch Klimawandelfolgen“ Schäden der Sturzfluten und Überschwemmungen im Juli 2021 in Deutschland - Eine ex-post-Analyse. Prognos AG in Kooperation mit Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

- [https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos\\_KlimawandelfolgenDeutschland\\_Detailuntersuchung%20Flut\\_AP2\\_3b\\_.pdf](https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_KlimawandelfolgenDeutschland_Detailuntersuchung%20Flut_AP2_3b_.pdf) (16.11.2023).
- Tukker, A.; Poliakov, E.; Heijungs, R.; Hawkins, T.; Neuwahl, F.; Rueda-Cantuche, J. M.; Giljum, S.; Moll, S.; Oosterhaven, J.; Bouwmeester, M. (2009): Towards a global multi-regional environmentally extended input-output database. In: *Ecological Economics*. Vol. 68, No. 7, S. 1928–1937 DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.11.010.
- UN (2022): World Population Prospects 2022, Medium Fertility Variant, Online Edition. In: *United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division*.  
<https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/> (27.09.2023).
- UNEP - International Resource Panel (2022): Global Material Flows Database.  
<https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database> (16.11.2023).
- USGS (2023a): International Minerals Statistics and Information. Minerals Yearbook (Volume III. -- Area Reports: International). <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/international-minerals-statistics-and-information> (16.11.2023).
- USGS (2023b): Mineral Commodity Summaries 2023. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/mcs2023>. (06.09.2023).
- VDMA (2022): International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). 13. Edition.  
<https://www.vdma.org/documents/34570/16191053/2022-04-05+PI+VDMA+PV+ITRPV+2022+DE.pdf/3f2b80e2-efd9-e76e-a9ca-bd3067fc92ee?t=1649064299346> (15.09.2023).
- Vestas (2017): Life cycle assessment of electricity production from an onshore V105-3.45 MW wind plant, Version 1.1. Vestas Wind Systems A/S. Vestas, Aarhus N, 8200, Denmark.  
[https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/V1053%2045MW\\_Mk3a\\_ISO\\_LCA\\_Final\\_31072017.pdf.coredownload.inline.pdf](https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/sustainability/reports-and-ratings/lcas/V1053%2045MW_Mk3a_ISO_LCA_Final_31072017.pdf.coredownload.inline.pdf) (22.09.2023).
- Viebahn, P.; Zelt, O.; Fischedick, M.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J. (2018): Technologien für die Energiewende - Technologiebericht Band 1: Teilbericht 2 zum Teilprojekt A im Rahmen des strategischen BMWi-Leitprojekts „Trends und Perspektiven der Energieforschung“. Wuppertal Report Zukünftige Energie- und Industriesysteme, Wuppertal. S. 904  
<https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7082/file/WR13-1.pdf> (06.11.2023).
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 21, No. 9, S. 1218–1230.
- Wirth, H. (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland - Fassung vom 19.12.2020. ISI Fraunhofer.  
<https://www.fokusenergie.net/share/energiewissen/dokumente/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> (15.09.2023).
- Wirth, H. (2023): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland- Fassung vom 16.01.2024. ISI Fraunhofer.  
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> (15.09.2023).
- World Bank (2023): World Development Indicators, GPD, PPP, Constant 2017 international \$.  
<https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators/preview/on> (29.09.2023).
- World Bank Group (2020): Results from the International Comparison Program (ICP) 2017 cycle.  
<https://databank.worldbank.org/source/icp-2017> (16.11.2023).

Wurzbacher, J. (2017): Capturing CO<sub>2</sub> from Air. Climeworks, Dresden. <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/ess/ressourcen/dateien/herbstworkshop-ess-2017/V4-HW2017-Jan-Wurzbacher-Capturing-CO2-from-Air-Climeworks.pdf?lang=de> (01.06.2023).

Yamanouchi, K. (2022): India publishes amended Rules detailing Extended Producer Responsibility for plastic packaging | Envilience ASIA. In: Envilience ASIA. [https://envilience.com/regions/south-asia/in/report\\_6052](https://envilience.com/regions/south-asia/in/report_6052) (26.09.2023).

Zahoransky, R.; Allelein, H.-J.; Bollin, E.; Oehler, H.; Schelling, U. (2010): Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung; Kompaktwissen für Studium und Beruf. Studium Energie und Umwelt Vieweg + Teubner, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9704-6> (13.07.2023).

## A Anhang Kapazitäten der Schlüsseltechnologien

### A.1 Windenergieanlagen onshore

**Tabelle 39: Erzeugter Strom mit onshore Windenergieanlagen, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	erzeugter Strom TWh/a	267,03	746,92	6.681,44
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	erzeugter Strom TWh/a	392,53	1.157,96	12.377,76
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	erzeugter Strom TWh/a	423,04	1.035,72	14.476,79
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	erzeugter Strom TWh/a	234,41	641,16	4.924,94
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	erzeugter Strom TWh/a	254,39	1.002,35	10.629,23
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	erzeugter Strom TWh/a	493,18	831,55	15.178,06
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	erzeugter Strom TWh/a	204,32	988,86	6.556,04
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	erzeugter Strom TWh/a	364,52	1.707,74	11.982,77
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	erzeugter Strom TWh/a	413,30	1.666,40	13.878,76

## A.2 Windenergieanlagen offshore

**Tabelle 40: Erzeugter Strom mit offshore Windenergieanlagen, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	erzeugter Strom TWh/a	71,34	163,28	900,41
GreenSupreme	2040	erzeugter Strom TWh/a	119,79	566,82	1.592,17
GreenSupreme	2050	erzeugter Strom TWh/a	132,14	1.007,57	2.248,22
GreenLate	2030	erzeugter Strom TWh/a	36,66	193,18	871,02
GreenLate	2040	erzeugter Strom TWh/a	78,62	527,62	1.617,62
GreenLate	2050	erzeugter Strom TWh/a	139,71	1.006,53	2.345,59
H <sub>2</sub>	2030	erzeugter Strom TWh/a	36,66	172,40	827,28
H <sub>2</sub>	2040	erzeugter Strom TWh/a	78,62	608,16	1.483,55
H <sub>2</sub>	2050	erzeugter Strom TWh/a	139,71	1.098,84	2.083,74

## A.3 Photovoltaik Dachanlagen

**Tabelle 41: Anzahl zugebauter Einheiten Photovoltaik Dachanlagen im Stützjahr**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	Anzahl zugebauter Einheiten	956.291	6.662.712	68.504.078
GreenSupreme	2040	Anzahl zugebauter Einheiten	394.165	6.259.394	66.262.613
GreenSupreme	2050	Anzahl zugebauter Einheiten	885.638	2.549.146	38.360.464
GreenLate	2030	Anzahl zugebauter Einheiten	351.844	2.712.007	41.735.009
GreenLate	2040	Anzahl zugebauter Einheiten	982.067	3.973.215	51.400.841
GreenLate	2050	Anzahl zugebauter Einheiten	1.861.060	6.510.003	80.299.026
H <sub>2</sub>	2030	Anzahl zugebauter Einheiten	326.341	6.817.958	68.627.387
H <sub>2</sub>	2040	Anzahl zugebauter Einheiten	1.000.386	7.844.383	74.949.278
H <sub>2</sub>	2050	Anzahl zugebauter Einheiten	2.228.304	9.210.950	106.858.121

#### A.4 Photovoltaik Freiflächenanlagen

**Tabelle 42: Erzeugter Strom mit Photovoltaik Freiflächenanlagen, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	erzeugter Strom TWh/a	29,19	178,21	2.408,55
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	erzeugter Strom TWh/a	33,23	329,53	4.988,98
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	erzeugter Strom TWh/a	36,41	371,11	6.477,45
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	erzeugter Strom TWh/a	39,38	214,46	3.217,99
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	erzeugter Strom TWh/a	59,90	391,88	6.764,64
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	erzeugter Strom TWh/a	105,78	491,49	10.724,83
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	erzeugter Strom TWh/a	68,34	173,03	2.336,64
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	erzeugter Strom TWh/a	170,33	313,85	4.511,94
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	erzeugter Strom TWh/a	138,78	423,99	5.740,80

## A.5 Wärmepumpen

**Tabelle 43: Anzahl zugebauter Wärmepumpen im Stützjahr**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	497.430,89	517.569,11	5.725.000,00
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	447.703,25	1.897.296,75	8.175.000,00
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	627.606,49	1.467.393,51	11.685.000,00
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	196.317,62	1.268.682,38	4.665.000,00
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	638.394,91	2.066.605,09	9.375.000,00
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	505.560,65	2.449.439,35	13.535.000,00
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	426.622,41	588.377,59	5.725.000,00
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	637.042,77	1.707.957,23	8.175.000,00
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	Anzahl zugebauter Anlagen	577.773,13	1.517.226,87	11.685.000,00

## A.6 Elektrolyse

**Tabelle 44: Heimisch produzierter Elektrolyse-Wasserstoff als Endprodukt, inklusive Exporte, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	1.381.751,46	6.700.665,89	48.016.449,70
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	2.792.326,94	29.047.958,63	207.430.686,72
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	2.325.437,86	38.642.622,19	322.695.702,99
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	2.601.834,86	21.187.897,33
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	1.108.523,77	18.291.332,78	125.513.077,12
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	2.979.983,32	30.651.793,16	305.390.088,52
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	204.170,14	7.878.247,21	48.016.449,70
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	2.480.066,72	40.210.468,45	207.430.686,72
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	5.404.503,75	53.923.575,94	322.695.702,99

**Tabelle 45: Heimisch produzierter Elektrolyse-Wasserstoff als Zwischenprodukt für PtX, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	44.306.260,08
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	501.694,26	-	284.095.344,98
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	1.887.619,76	-	472.722.395,70
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	20.564.010,32
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	184.992.148,46
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	1.233.739,68	-	491.796.929,55
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	3.254.626,65	41.303.147,60
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	22.304.743,47	261.911.819,69
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	37.674.302,07	437.853.701,21

## A.7 Methanisierung

**Tabelle 46: Heimische Produktion von PtG-Methan, inklusive Exporte, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	-
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	1.580.140,66	-	-
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	5.945.263,78	-	-
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	-
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	-
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	3.885.797,32	-	15.139.411,92
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	-
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	-
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	-	-

## A.8 Methanolsynthese

**Tabelle 47: Heimische Produktion von PtL-Methanol, inklusive Exporte, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	121.069.988,14
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	890.134.351,30
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	-	1.556.721.650,87
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	52.462.859,01
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	597.192.571,18
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	-	1.601.408.767,47
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	3.297.324,21	12.777.580,76	108.079.878,14
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	12.802.117,32	76.222.247,68	801.109.986,30
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	29.949.766,66	120.418.733,34	1.406.353.150,87

## A.9 FT-Synthese

**Tabelle 48: Heimische Produktion von PtL-FT-Kraftstoff, inklusive Exporte, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	28.527.900,79
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	124.697.638,84
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	-	168.830.963,12
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	15.148.672,56
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	72.210.226,32
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	-	175.102.205,25
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	heimische Produktion t/a	-	-	29.041.418,14
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	heimische Produktion t/a	-	-	124.945.130,42
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	heimische Produktion t/a	-	-	174.559.181,75

## A.10 Solarthermische Kraftwerke

**Tabelle 49: Erzeugter Strom mit Solarturm-Kraftwerken, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	8,75	174,66
GreenSupreme	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	9,32	276,15
GreenSupreme	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	-	-
GreenLate	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	6,75	125,23
GreenLate	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	14,65	512,41
GreenLate	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	20,45	844,38
H <sub>2</sub>	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	8,75	174,66
H <sub>2</sub>	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	9,32	276,15
H <sub>2</sub>	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	-	-

**Tabelle 50: Erzeugter Strom mit Parabolrinnen-Kraftwerken, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	erzeugter Strom TWh/a		78,71	1.571,93
GreenSupreme	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	177,14	5.246,83
GreenSupreme	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	215,46	7.923,83
GreenLate	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	60,71	1.127,05
GreenLate	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	131,81	4.611,68
GreenLate	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	184,01	7.599,41
H <sub>2</sub>	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	78,71	1.571,93
H <sub>2</sub>	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	177,14	5.246,83
H <sub>2</sub>	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	215,46	7.923,83

## A.11 Brennstoffzellen

**Tabelle 51: Erzeugter Strom mit PEMFC im Verkehr, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	86,83	286,35
GreenSupreme	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	122,71	769,63
GreenSupreme	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	121,70	1.005,56
GreenLate	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	47,66	217,72
GreenLate	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	124,66	724,22
GreenLate	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	128,10	1.114,31
H <sub>2</sub>	2030	erzeugter Strom TWh/a	1,66	85,17	286,35
H <sub>2</sub>	2040	erzeugter Strom TWh/a	12,71	110,01	769,63
H <sub>2</sub>	2050	erzeugter Strom TWh/a	77,54	44,16	1.005,56

**Tabelle 52: Stationär erzeugter Strom, jeweils zur Hälfte mit SOFC und PEMFC, TWh/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	0,44	37,51
GreenSupreme	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	6,46	124,92
GreenSupreme	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	27,20	333,63
GreenLate	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	0,44	33,52
GreenLate	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	6,46	125,89
GreenLate	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	27,20	350,85
H <sub>2</sub>	2030	erzeugter Strom TWh/a	-	0,44	37,51
H <sub>2</sub>	2040	erzeugter Strom TWh/a	-	6,46	124,92
H <sub>2</sub>	2050	erzeugter Strom TWh/a	-	27,20	333,63

## A.12 Geothermie

**Tabelle 53: Anzahl zugebauter Geothermie-Anlagen im Stützjahr**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	Anzahl zugebauter Anlagen	1,70	13,04	228,98
GreenSupreme	2040	Anzahl zugebauter Anlagen	1,13	41,71	419,88
GreenSupreme	2050	Anzahl zugebauter Anlagen	1,47	52,92	421,50
GreenLate	2030	Anzahl zugebauter Anlagen	1,28	14,76	163,61
GreenLate	2040	Anzahl zugebauter Anlagen	1,55	47,33	487,60
GreenLate	2050	Anzahl zugebauter Anlagen	0,86	55,88	515,62
H <sub>2</sub>	2030	Anzahl zugebauter Anlagen	0,77	14,28	228,98
H <sub>2</sub>	2040	Anzahl zugebauter Anlagen	1,02	42,07	419,88
H <sub>2</sub>	2050	Anzahl zugebauter Anlagen	2,03	52,75	421,50

## A.13 Energiespeicher

**Tabelle 54: Anzahl zugebauter Energiespeichereinheiten im Stützjahr**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
GreenSupreme	2030	Anzahl zugebauter Einheiten	-	-	-
GreenSupreme	2040	Anzahl zugebauter Einheiten	-	-	-
GreenSupreme	2050	Anzahl zugebauter Einheiten	-	-	-
GreenLate	2030	Anzahl zugebauter Einheiten	-	12,86	47,31
GreenLate	2040	Anzahl zugebauter Einheiten	1,05	323,30	3.292,78
GreenLate	2050	Anzahl zugebauter Einheiten	588,36	336,16	3.340,08
H <sub>2</sub>	2030	Anzahl zugebauter Einheiten	-	-	-
H <sub>2</sub>	2040	Anzahl zugebauter Einheiten	-	-	-
H <sub>2</sub>	2050	Anzahl zugebauter Einheiten	-	-	-

## A.14 CO2-Bereitstellung

**Tabelle 55: Bereitstellung von DAC-CO2 für die PtX-Produktion, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	DAC-CO2 t/a	-	-	336.924.620,08
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	DAC-CO2 t/a	-	-	2.207.461.290,90
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	DAC-CO2 t/a	-	-	3.704.375.932,51
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	DAC-CO2 t/a	-	-	154.835.447,47
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	DAC-CO2 t/a	-	-	1.444.681.933,32
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	DAC-CO2 t/a	-	-	3.841.379.415,40
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	DAC-CO2 t/a	-	26.443.841,57	312.109.171,55
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	DAC-CO2 t/a	-	181.226.040,71	2.027.020.060,24
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	DAC-CO2 t/a	-	306.103.704,33	3.416.436.738,80

## A.15 Meerwasserentsalzungsanlagen

**Tabelle 56: Bereitstellung von aufbereitetem Meerwasser für die PtX-Produktion, t/a**

Szenario	Jahr	Einheit	Deutschland	EU ohne DE	Welt ohne EU
<b>GreenSupreme</b>	<b>2030</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	40.809.451,41	1.026.748.145,49
<b>GreenSupreme</b>	<b>2040</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	176.912.455,59	5.966.303.380,17
<b>GreenSupreme</b>	<b>2050</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	235.347.387,67	9.787.240.469,55
<b>GreenLate</b>	<b>2030</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	15.846.104,73	470.279.500,45
<b>GreenLate</b>	<b>2040</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	111.400.757,58	3.825.973.314,53
<b>GreenLate</b>	<b>2050</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	186.680.381,40	9.961.358.483,20
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2030</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	101.325.224,16	977.206.490,98
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2040</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	589.155.141,78	5.600.012.899,33
<b>H<sub>2</sub></b>	<b>2050</b>	aufbereitetes Wasser t/a	-	894.246.351,42	9.206.352.785,63

## B Rohstoffbedarfe

### B.1 Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien

**Tabelle 57: Weltweiter Rohstoffbedarf der Schlüsseltechnologien in Kilotonnen**

Jahr	2030	2030	2030	2040	2040	2040	2050	2050	2050
Szenario	Late	Suprem e	H2	Late	Supreme	H2	Late	Suprem e	H2
<b>Onshore-WEA</b>	156.182	184.441	227.530	358.423	373.049	460.732	547.622	472.223	582.007
<b>Offshore-WEA</b>	9.966	9.188	10.795	21.550	19.147	23.094	35.948	29.850	35.840
<b>PV-Dach</b>	32.133	54.154	54.219	40.423	51.493	59.815	63.602	29.322	84.241
<b>PV-Frei</b>	19.736	10.411	12.958	38.513	20.984	25.088	56.969	26.669	31.350
<b>Geothermie</b>	433	587	588	1.292	1.114	1.115	1.378	1.146	1.147
<b>CSP-Solarturm</b>	214	297	297	854	462	462	1.401	0	0
<b>CSP-Parabolrinnen</b>	24.273	33.732	33.732	96.936	110.842	110.842	159.059	166.331	166.331
<b>Wärmepumpe</b>	814	895	895	1.604	1.397	1.397	2.190	1.830	1.830
<b>Energiespeicher</b>	43	0	0	2.563	0	0	3.022	0	0
<b>Elektrolyse</b>	865	1.948	1.960	6.429	10.135	10.395	16.225	16.177	16.667
<b>Methanisierung</b>	0	0	0	0	7	0	52	18	0
<b>Methanolsynthese</b>	61	125	137	866	974	1.206	2.054	1.391	1.798
<b>FT-Synthese</b>	15	23	26	132	163	193	235	145	192
<b>CO2-Bereitstellung</b>	6.691	14.561	14.631	62.434	95.398	95.432	166.010	160.089	160.874
<b>Meerwasserentsalzung</b>	8	18	18	66	103	104	171	169	170
<b>Brennstoffzelle n</b>	307	409	416	1.016	1.007	1.042	1.744	1.462	1.560

## C Anhang Rezyklateinsatzquoten

### C.1 Sekundärmetallanteile

**Tabelle 58: Zusammenfassung der für REFINE angenommenen Sekundäranteile der untersuchten Metalle für alle Regionen, Jahre und Szenarien**

Material	Jahr	Szenario/Region									
		GreenSupreme			GreenLate			H2			
		DE	RoE	RoW	DE	RoE	RoW	DE	RoE	RoW	
Eisen/Stahl	2010	42 %	52 %	24 %	42 %	52 %	24 %	42 %	52 %	24 %	
	2030	63 %	63 %	41 %	58 %	58 %	38 %	50 %	50 %	41 %	
	2040	67 %	67 %	53 %	58 %	58 %	46 %	55 %	55 %	53 %	
	2050	75 %	75 %	59 %	62 %	62 %	49 %	60 %	60 %	59 %	
Aluminium	2010	38 %	70 %	47 %	38 %	70 %	47 %	38 %	70 %	47 %	
	2030	67 %	67 %	45 %	63 %	63 %	39 %	67 %	67 %	45 %	
	2040	59 %	59 %	58 %	51 %	51 %	47 %	59 %	59 %	58 %	
	2050	66 %	66 %	65 %	55 %	55 %	51 %	66 %	66 %	65 %	
Kupfer	2010	30 %	26 %	17 %	30 %	26 %	17 %	30 %	26 %	17 %	
	2030	49 %	49 %	36 %	43 %	43 %	32 %	49 %	49 %	36 %	
	2040	51 %	51 %	45 %	41 %	41 %	37 %	51 %	51 %	45 %	
	2050	59 %	59 %	51 %	49 %	49 %	42 %	59 %	59 %	51 %	
Blei	2010	69 %	77 %	53 %	69 %	77 %	53 %	69 %	77 %	53 %	
	2030	78 %	78 %	78 %	75 %	75 %	75 %	78 %	78 %	78 %	
	2040	88 %	88 %	88 %	79 %	79 %	79 %	88 %	88 %	88 %	
	2050	95 %	95 %	95 %	83 %	83 %	83 %	95 %	95 %	95 %	
Zink	2010	13 %	12 %	5 %	13 %	12 %	5 %	13 %	12 %	5 %	
	2030	45 %	45 %	45 %	41 %	41 %	41 %	45 %	45 %	45 %	
	2040	64 %	64 %	64 %	48 %	48 %	48 %	64 %	64 %	64 %	
	2050	82 %	82 %	82 %	54 %	54 %	54 %	82 %	82 %	82 %	
Nickel	2010	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	30 %	
	2030	38 %	38 %	35 %	35 %	35 %	33 %	38 %	38 %	35 %	

		Szenario/Region									
		2040	75 %	75 %	52 %	50 %	50 %	47 %	75 %	75 %	52 %
		2050	95 %	95 %	76 %	65 %	65 %	68 %	95 %	95 %	76 %
<b>Lithium</b>	2010	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	2030	15 %	15 %	15 %	5 %	5 %	5 %	15 %	15 %	15 %	15 %
	2040	55 %	55 %	30 %	8 %	8 %	8 %	55 %	55 %	30 %	
	2050	70 %	70 %	54 %	20 %	20 %	20 %	70 %	70 %	54 %	
<b>Gold</b>	2010	12 %	12 %	12 %	12 %	12 %	12 %	12 %	12 %	12 %	12 %
	2030	31 %	31 %	31 %	29 %	29 %	29 %	31 %	31 %	31 %	
	2040	48 %	48 %	48 %	43 %	43 %	43 %	48 %	48 %	48 %	
	2050	42 %	42 %	42 %	37 %	37 %	37 %	42 %	42 %	42 %	
<b>Silber</b>	2010	19 %	19 %	21 %	19 %	19 %	21 %	19 %	19 %	21 %	
	2030	45 %	45 %	42 %	41 %	41 %	40 %	45 %	45 %	42 %	
	2040	48 %	48 %	44 %	42 %	42 %	44 %	48 %	48 %	44 %	
	2050	50 %	50 %	43 %	42 %	42 %	46 %	50 %	50 %	43 %	
<b>Platin</b>	2010	11 %	11 %	24 %	11 %	11 %	24 %	11 %	11 %	24 %	
	2030	50 %	50 %	46 %	40 %	40 %	43 %	50 %	50 %	46 %	
	2040	75 %	75 %	28 %	60 %	60 %	25 %	75 %	75 %	28 %	
	2050	95 %	95 %	19 %	80 %	80 %	16 %	95 %	95 %	19 %	