INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG

Kurzstudie „Nutzung und Reduktionspotentiale von Basismetallen in Deutschland und der EU“

im Auftrag von PowerShift e.V.

Monika Dittrich, Sonja Limberger, Birte Ewers, Florian Petri, Anja Doppelmayr

Heidelberg, 2024

ifeu Wilckensstraße 3 69120 Heidelberg Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0 E-Mail ifeu@ifeu.de www.ifeu.de

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **3**
Tabellenverzeichnis **5**

1 Einführung **6**
Problemstellung und Zielsetzung 6
Aufbau der Studie 8

2 Status Quo **9**
Bedürfnisfelder und Metallkonsum 9
Metalle und Importe 10
Rohstoffkonsum nach Endnachfragestruktur 11
Kupfer 12
Eisen und Stahl 16
Aluminium 19
Nickel 22

3 Zukünftige Nutzung von Eisen, Kupfer, Aluminium und Nickel **26**
Überblick über zukünftige Nutzung: RESCUE Studien 26
Weitere Studien zur Einordnung zukünftiger Nutzung der vier Basismetalle 29

4 Einsparpotenziale nach Bereichen **35**
Verlängerung der Nutzbarkeit von Gütern 36
Einsparpotenziale am Beispiel von Smartphones 37
Rezyklateinsatzquote erhöhen 41
Recycling von Anlagen für Erneuerbare Energien 43
Ansatzpunkte im Bereich Verkehr 44
Maßnahmen im Bereich Wohnungsbau 50
Fenster und Rahmen 59
Einsparpotenziale im Bereich Gesundheitssektor 62

5 Fazit und Politikempfehlungen **65**

Literaturverzeichnis **73**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil Basismetalle am gesamten metallischen Rohstoffkonsum [DMC und RMC] in Deutschland und der EU, 2019 7

Abbildung 2: Anteil der Bedürfnisfelder am RMC von Metallen, Konsum der privaten Haushalte im Jahr 2019 10

Abbildung 3: Zusammensetzung des Rohstoffkonsums (RMC) in Deutschland im Jahr 2019 nach Endnachfragekategorien 11

Abbildung 4: Verwendung von Kupfer in Deutschland, EU27 und Global 2019/2020 nach Anwendungsbereichen 13

Abbildung 5: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Kupfer in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME 14

Abbildung 6: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär- und Sekundärkupfer je Tonne [Index 1 = Primärkupfer] 15

Abbildung 7: Verwendung von Stahl in Deutschland und der EU27, 2020 16

Abbildung 8: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Eisen in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME 17

Abbildung 9: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär und Sekundäreisen je Tonne [Index 1 = Primäreisen] 18

Abbildung 10: Anwendungen von Aluminium in Deutschland, EU27 und Global in 2019/2020 20

Abbildung 11: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Aluminium in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME 20

Abbildung 12: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär und Sekundäraluminium je Tonne [Index 1 = Primäraluminium] 22

Abbildung 13: Verwendung von Nickel in Deutschland, EU27, und Global 2020 nach Bereichen 23

Abbildung 14: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Nickel in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME 24

Abbildung 15: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär und Sekundärnickel (Class 1) je Tonne [Index 1 = Primärnickel] 25

Abbildung 16: Letzte inländische Verwendung von Eisen (oben), Kupfer, Aluminium und Nickel (unten) in Deutschland 2010, 2030, 2040 und 2050 gemäß den RESCUE Szenarien in Mio. t Metallgehalt 27

Abbildung 17: Deutscher Anteil der letzten inländischen Verwendung einzelner Metalle in Prozent an der (geschätzten) globalen Produktion in 2030, 2040 und 2050 und Anteil Bevölkerung Deutschlands an Weltbevölkerung. 28

Abbildung 18: Geschätzte Bestandteile eines durchschnittlichen Smartphones inklusive Batterie in Gramm 38

Abbildung 19: Metallgehalt (in Tonnen) der in 2022 in Deutschland verkauften Smartphones 39
Abbildung 20: Rohstoffbedarf für ausgewählte Rohstoffe in Tonnen RME für Smartphones verkauft in Deutschland 2022 41
Abbildung 21: Materialzusammensetzung für unterschiedlicher Antriebsstränge eines mittleren PkW für Basismetalle 45
Abbildung 22: Anzahl der Neuzulassungen (NZL) in Mio. Stück differenziert nach konventionellen Pkw und E-Pkw im MMS Szenario des Projektionsberichts 2023 46
Abbildung 23: Anzahl der Neuzulassungen (NZL) in Mio. Stück differenziert nach Größensegmenten 47
Abbildung 24: Jährliche Metallbedarfe der Neuzulassungen differenziert nach Metallen und Antriebsstrang bis 2050 in Mio. t sowie kumulierter Bedarf bis 2050 – Status Quo 47
Abbildung 25: Materialeinsparungen der Varianten 1 bis 9 gegenüber dem Bedarf im Status Quo für ausgewählte Jahre in 1000 t 48
Abbildung 26: Kumulierte Materialeinsparungen der Variationen 1 bis 9 von 2025 bis 2050 gegenüber dem Bedarf im Status Quo, differenziert nach Basismetallen 49
Abbildung 27: Metallbedarfe in t pro Wohneinheit (WE) für unterschiedliche Gebäudetypen 51
Abbildung 28: Historische (bis 2020) und geschätzte Entwicklung (ab 2025) der fertiggestellten Wohneinheiten und Anteile der Gebäudetypen an fertiggestellten Wohneinheiten 52
Abbildung 29: Geschätzter Metallbedarf durch Neubau für ausgewählte Jahre bis 2050 im Status Quo 53
Abbildung 30: Jährliche Metalleinsparung in 1000 t Metall gegenüber dem Materialbedarf im Status Quo für Varianten 1 bis 3 54
Abbildung 31: Kumulierte Metalleinsparungen in Mio. t Metall gegenüber Materialbedarf im Status Quo (ab 2025) für die Varianten 1 bis 3 55
Abbildung 32: Anzahl der WE im Suffizienz-Szenario und spezifische Metallbedarfe 57
Abbildung 33: Metallbedarf im Suffizienz-Szenario und im Status Quo im Jahr 2025 58
Abbildung 34: Stoffliche Zusammensetzung verschiedener Fenstertypen 60
Abbildung 35: Stoffliche Zusammensetzung der 2022 in Deutschland verkauften Fenstertypen in Kilotonnen 61
Abbildung 36: Bedarf an Basismetallen der 2022 in Deutschland verkauften Fenster in Kilotonnen RME 62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aktuelle und zukünftige Kupferbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global	30
Tabelle 2:	Aktuelle und zukünftige Eisen- und Stahlbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global	31
Tabelle 3:	Aktuelle und zukünftige Aluminiumbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global	32
Tabelle 4:	Aktuelle und zukünftige Nickelbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global	34
Tabelle 5:	EoL-Abfälle ausgewählter Technologien in der EU in 2030	43
Tabelle 6:	Übersicht der Metalleinsparungen gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-9	50
Tabelle 7:	Übersicht der Metalleinsparungen im Wohnungsbau gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-3	56
Tabelle 8:	Übersicht der Rohstoffbedarfe in t RME bei Smartphones	65
Tabelle 9:	Übersicht der Metalleinsparungen im Verkehr gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-9	69
Tabelle 10:	Übersicht der Metalleinsparungen im Wohnungsbau gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-3	70
Tabelle 11:	Übersicht der Metallbedarfe der 2022 in Deutschland verkauften Fenster in Tonnen RME und Varianten	71

1 Einführung

Problemstellung und Zielsetzung

Unser Alltag steckt voller Metalle, auch wenn dies nicht immer direkt ersichtlich ist. Wir brauchen Metalle für unsere Fortbewegungsmittel und Informations- sowie Kommunikationstechnologien. In Wohngebäuden sind diverse Metalle in Form von Rohren, Leitungen oder Trägern verbaut. Zur Produktion unserer Kleidung bedarf es Maschinen und Anlagen, ebenso wie für die Lebensmittelverarbeitung. Auch der Gesundheitssektor kommt nicht ohne Metalle aus.

Der deutsche Rohstoffkonsum[1] liegt mit knapp 16 t pro Kopf auf einem konstant hohen Niveau, genauer gesagt auf dem exakt gleichen Level wie schon im Jahr 2010. (ifeu 2023; Lutter et al. 2022) Das im internationalen Vergleich als nachhaltig eingestufte Niveau von etwa sieben Tonnen Rohstoffkonsum pro Kopf (davon fünf Tonnen abiotisch und zwei Tonnen biotisch) überschreitet Deutschland damit um mehr als das Doppelte (Tauer und Aechtner 2023).

Etwa elf Prozent der in Deutschland für den Konsum genutzten Rohstoffe (inkl. biotischer Rohstoffe) sind Metalle. (Lutter et al. 2022) Dieser Metallkonsum wird von einigen wenigen Basismetallen dominiert. In Deutschland sind etwa 94 Prozent des Metallkonsums auf die vier Metalle Eisen, Aluminium, Kupfer und Nickel zurückzuführen (ohne Rohstoffrucksack). Wird der gesamte Rohstoffrucksack berücksichtigt, sind es 76 Prozent des Metallkonsums.[2]

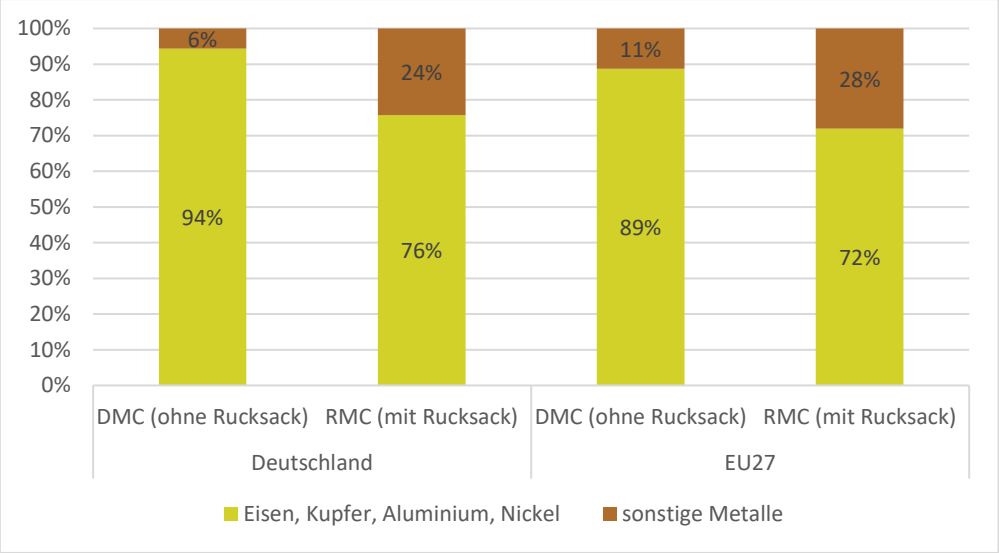
In der EU entfallen etwa ca. 89 Prozent (ohne Rucksack) bzw. 72 Prozent (mit Rucksack) auf die Metalle Eisen, Aluminium, Kupfer und Nickel (siehe Abbildung 1). Auch und insbesondere für diese Metalle wird sich in Zukunft der Bedarf durch die Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaft deutlich verschieben.

---

[1] Der Rohstoffkonsum oder kurz RMC (*Raw Material Consumption*) ist ein Materialflussindikator, der die Masse der Rohstoffe, die entlang der Wertschöpfungsketten aller Waren und Dienstleistungen zum Einsatz kommen und in den Endkonsum fließen, bemisst. Der RMC berücksichtigt alle indirekten Rohstoffflüsse, d.h. die Masse aller Rohstoffe, die bei der Erzeugung von gehandelten Waren zum Einsatz kommen. Diese gehandelten Güter werden in sogenannte „Rohstoffrucksäcke“ (RME; *Raw Material Equivalents*) umgerechnet. Hierin liegt ein wichtiger methodischer Unterschied zum Inländischen Materialkonsum (DMC; *Domestic Material Consumption*). Bei diesem werden die Massen der direkt importierten (und exportierten) Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren eingerechnet, ohne eine Umrechnung in Rohmaterialäquivalente (RME) vorzunehmen. Im Folgenden wird zwischen den beiden Indikatoren mit dem Hinweis „mit“ (RMC) oder „ohne Rucksack“ (DMC) differenziert.

[2] Die Unterschiede der Anteile basieren auf der Tatsache, dass einmal der gesamte Rohstoffrucksack, inklusive der Vorketten betrachtet wird, und im anderen Fall ausschließlich reine Produktgewichte einbezogen werden. Der Anteil von Metallen mit sehr niedrigen Erzgehalten wie z.B. Gold, Titan, Platin und Zink liegt bei Berücksichtigung des Rohstoffrucksacks daher anteilsmäßig höher.

Abbildung 1: Anteil Basismetalle am gesamten metallischen Rohstoffkonsum [DMC und RMC] in Deutschland und der EU, 2019



Quelle: eigene Berechnungen, ifeu für Eurostat (ifeu 2022, 2023)
Hinweis: DMC = Inländischer Materialkonsum; RMC = Rohstoffkonsum/Materialfußabdruck (siehe S. 6)

Drei der vier betrachteten Metalle werden von der EU-Kommission im Jahr 2023 als kritisch bzw. strategisch kritisch eingestuft: Aluminium und das Aluminiumerz Bauxit, Nickel und Kupfer. Gründe dafür sind mangelnden Substitutionsmöglichkeiten in elektrischen Anwendungen, die zum Teil hohen Länderkonzentrationen beim Abbau sowie limitierte Produktionskapazitäten in der EU. (European Commission 2023)

Bergbau und Weiterverarbeitung gehen zudem häufig mit Klima- und Umweltbelastungen sowie Menschenrechtsverletzungen einher. Vor allem der Kupfer- und Nickelabbau besitzt ein hohes Gefährdungspotenzial in nahezu allen Umweltgefährdungsbereichen (Wasserknappheit, Verlust der Biodiversität, Freisetzung von Schwermetallen, Störfallgefahr etc.). Die Bauxit- bzw. Aluminium- und Eisengewinnung weist ein mittleres bis hohes Gefährdungspotenzial auf. (Lutter et al. 2022) Das Umweltgefährdungspotenzial und weitere Umweltwirkungen werden bei Produktdesigner*innen, Einkäufer*innen oder Endverbraucher*innen, zum Beispiel bei Elektronikprodukten, oft nicht mitbedacht, da sie in der Regel geografisch außerhalb der deutschen Landesgrenze anfallen. (Dehoust et al. 2017, 2020)

Aufgrund der einhergehenden Umweltrisiken sowie ihrer Einstufung als kritische bzw. strategische Rohstoffe, sollen im Rahmen der vorliegenden Kurzstudie Einsparpotenziale in der Nutzung der Basismetalle Eisen, Kupfer, Aluminium und Nickel in Deutschland und der EU aufgezeigt werden. Ziel ist es, den aktuellen gesellschaftlichen und politischen Diskurs, der vielfach auf Lithium, Kobalt, Seltene Erden und Graphit fokussiert ist (BMWK 2019; Noyan 2023), zu erweitern und die Diskussion über Einsparpotenziale bei den mengenmäßig stark relevanten Basismetallen zu fördern. Die Umsetzung von Reduktionsmaßnahmen hat vor dem Hintergrund globaler und sozialer Gerechtigkeit, ökologischen und klimarelevanten Fragestellungen sowie mit Hinblick auf die Versorgungssicherheit von Deutschland und der EU eine erhebliche Dringlichkeit.

Aufbau der Studie

Im zweiten Kapitel der Studie wird zunächst die aktuelle Nutzung der vier Basismetalle in Deutschland und der EU aufgezeigt. Die Verwendung nach Bedürfnisfeldern sowie die Bedeutung der Importe und der Einfluss unterschiedlicher Metallkonsumenten (u.a. private Haushalte bzw. Staat und private Organisationen) werden erläutert. Anschließend werden die vier Basismetalle im Einzelnen genauer untersucht. Im dritten Kapitel wird ein Ausblick auf die zukünftige Nachfrage gegeben und mögliche Änderungen der Nutzungsstruktur für Deutschland werden beschrieben. Danach werden im vierten Kapitel relevante Einsparpotenziale entlang der Wertschöpfungsketten identifiziert und exemplarisch quantifiziert. Im letzten Kapitel widmet sich die Studie abschließend der Formulierung politischer Handlungsempfehlungen.

2 Status Quo

Bedürfnisfelder und Metallkonsum

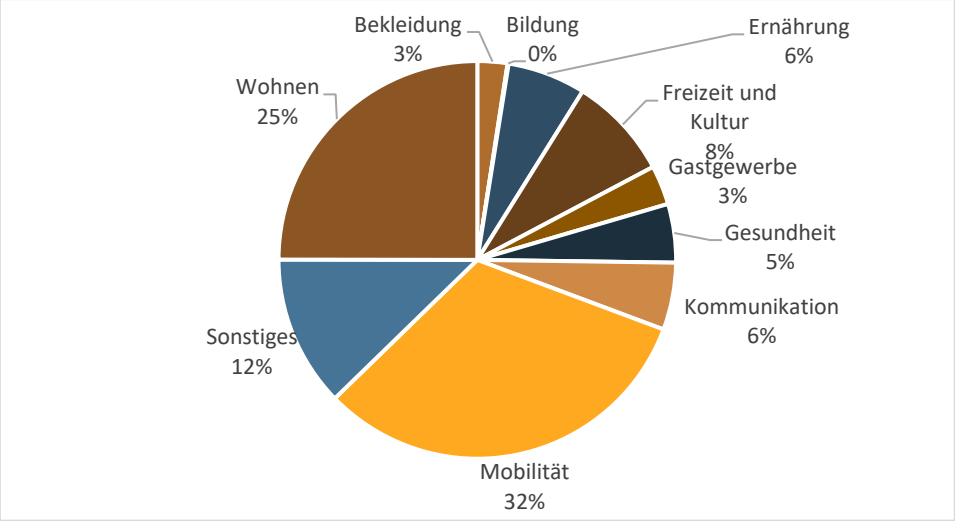
In Deutschland zeigt sich beim Konsum von biotischen, mineralischen und fossilen Primärrohstoffen eine konstante, teilweise sogar abnehmende Entwicklung. Diese Tendenz gilt nicht für Metalle[1]. Stattdessen steigt der Ge- und Verbrauch metallischer Primärrohstoffe. So wurden im Jahr 2019 in Deutschland rund 168 Mio. Tonnen metallische Primärrohstoffe konsumiert. (Lutter et al. 2022)

In Deutschland nutzen wir Metalle in allen Bedürfnisfeldern unseres Lebens. Ca. 76 Mio. t Metalle waren es 2019 insgesamt für unsere Bekleidung, Ernährung, Gesundheit, Kommunikation, Mobilität, Wohnen und Sonstiges, wie Bildung, Freizeit und Kultur (siehe Abbildung 2). Etwa 24 Mio. t (mit Rucksack) dieser für den privaten Konsum genutzten Metalle sind dem Bedürfnisfeld Mobilität zuzuordnen. Von den 76 Mio. t Metallerzen nimmt der Bereich Mobilität demnach ein Drittel und damit den größten Anteil ein. Dahinter verbergen sich z.B. Rohstoffbedarfe für den Kauf und Betrieb von Privatfahrzeugen. Weitere 19 Mio. Tonnen Metalle (mit Rucksack) werden für das Bedürfnisfeld Wohnen aufgebracht, was einem Viertel des gesamten Metallbedarfs (der Bedürfnisfelder des Konsums der privaten Haushalte) entspricht. Der Metallbedarf des Wohnens umfasst unter anderem die Aufwendungen für die Instandhaltung und Reparatur von Wohnungen, die Güter für die Haushaltsführung (z. B. Innenausstattung, Heimtextilien, Haushaltsgeräte und sonstige Gebrauchsgüter) sowie Dienstleistungen im Zusammenhang mit der Wohnung, darunter die Versorgung mit Wasser, Strom und Wärme.

Mehr als die Hälfte aller Metalle, die in Deutschland von Privathaushalten genutzt werden, entfällt auf die beiden Sektoren Mobilität und Wohnen. Maßnahmen zur Verminderung des Metallverbrauchs in diesen beiden Bedürfnisfeldern ermöglichen daher eine besonders große Hebelwirkung mit Hinblick auf die genutzten Volumina.

[1] Das Fünf-Jahres-Mittel von 2015 bis 2019 liegt 17 Prozent über dem Mittel von 2010 bis 2014.

Abbildung 2: Anteil der Bedürfnisfelder am RMC von Metallen, Konsum der privaten Haushalte im Jahr 2019



Quelle: ifeu 2023; Lutter et al. 2022

Metalle und Importe

Da Deutschland mit einigen Ausnahmen[1] über keine nennenswerten derzeit explorierten Vorkommen für metallische Primärrohstoffe verfügt, müssen diese nahezu vollständig (zu 99,7 Prozent) importiert werden. Der Großteil stammt aus Ländern außerhalb der EU (mindestens[2] 61 Prozent). (Vgl. Erdle 2019; Lutter et al. 2022) Diese hohe Importabhängigkeit birgt das Risiko, indirekte Kosten wie Menschenrechtsverletzungen und Umweltzerstörung auszulagern. Zugleich können Versorgungsengpässe im Produktionsprozess ökonomisch schwerwiegende Folgen haben und die gesamte Lieferkette betreffen.

Gegenwärtig werden jedoch nur 22 Prozent der importierten Metalle für den inländischen Konsum genutzt. Das bedeutet, dass der Großteil metallischer Rohstoffe (78 Prozent) nach entsprechender Weiterverarbeitung in Deutschland wieder exportiert wird. (ifeu 2023; Lutter et al. 2022) Dieser „Durchlaufcharakter“ – also der Import und spätere Export von Metallen ohne Nutzung im Importland – hat Auswirkungen auf die entstehende Bilanzierung von CO_2-Emissionen, die mit den Rohstoffen und Produkten behaftet sind. Ein Beispiel zeigt die nachfolgende Infobox.

[1] Lithiumvorkommen im Oberrheingraben (LGBR 2021)
[2] Viele Güter, die auf dem Seeweg transportiert werden, erreichen das europäische Festland über den niederländischen Hafen Rotterdam. Von dort werden sie in andere Länder weiterexportiert und daher nicht korrekt mit Herkunftsort in der Importstatistik erfasst.

Infobox: „Durchlaufcharakter“ am Beispiel Kraftwagen

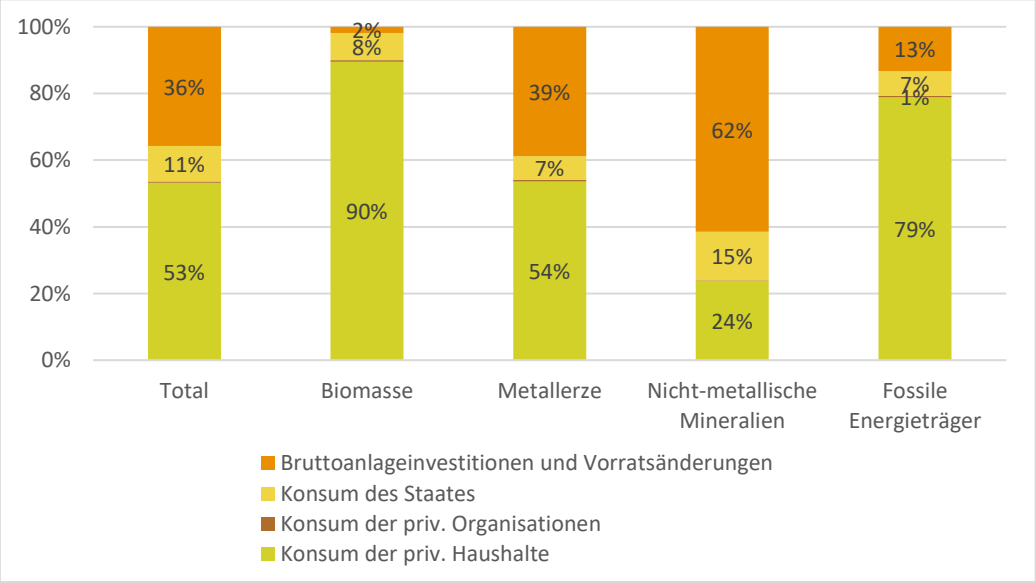
Gut verdeutlichen lässt sich der „Durchlaufcharakter“ von Metallen am Beispiel von Kraftwagen und Kraftwagenteilen. Hier zeigt sich, dass lediglich ein knappes Viertel (23 Prozent) der, durch importierte Kraftwagen und -teile entstehenden Emissionen, in die privaten deutschen Haushalte fließt. Mehr als die Hälfte (63 Prozent) der CO_2-Emissionen, sowohl aus der inländischen Produktion als auch von importierten Produkten, die in Deutschland weiterverarbeitet werden (sogenannte Vorleistungen), entfallen auf die Exporte. (Destatis 2021a)

Für die Bewertung des metallischen Rohstoffrucksacks ist es daher besonders wichtig, diese Handelsstrukturen zu berücksichtigen. Bei fossilen Rohstoffen, bei denen immerhin auch 80 Prozent des deutschen Rohstoffeinsatzes aus Importen stammt, werden etwa 45 Prozent der Importe für die inländische Verwendung genutzt. Bei biotischen Rohstoffen sind es über 55 Prozent. Bei mineralischen Rohstoffen spielen Importe eher eine untergeordnete Rolle. (ifeu 2023; Lutter et al. 2022)

Rohstoffkonsum nach Endnachfragestruktur

Interessant ist die Endnachfragestruktur des Rohstoffkonsums (siehe Abbildung 3). Denn der Rohstoffkonsum wird nicht nur durch die privaten Haushalte bestimmt, sondern zusätzlich vom Konsum des Staates, privater Organisationen und den sogenannten Bruttoanlageinvestitionen, also beispielsweise Gebäuden, Infrastrukturen, Maschinen und Anlagen, die langfristig genutzt werden.

Abbildung 3: Zusammensetzung des Rohstoffkonsums (RMC) in Deutschland im Jahr 2019 nach Endnachfragekategorien



Quelle: ifeu 2023; Lutter et al. 2022

Der Rohstoffkonsum nach Endnachfrage zeigt, dass insbesondere der Konsum von biotischen Rohstoffen und fossilen Energieträgern stark von den privaten Haushalten dominiert wird: Rund 90 Prozent des deutschen Rohstoffkonsums von Biomasse und 80 Prozent der fossilen Energieträger werden von privaten Haushalten in Anspruch genommen. Bei den

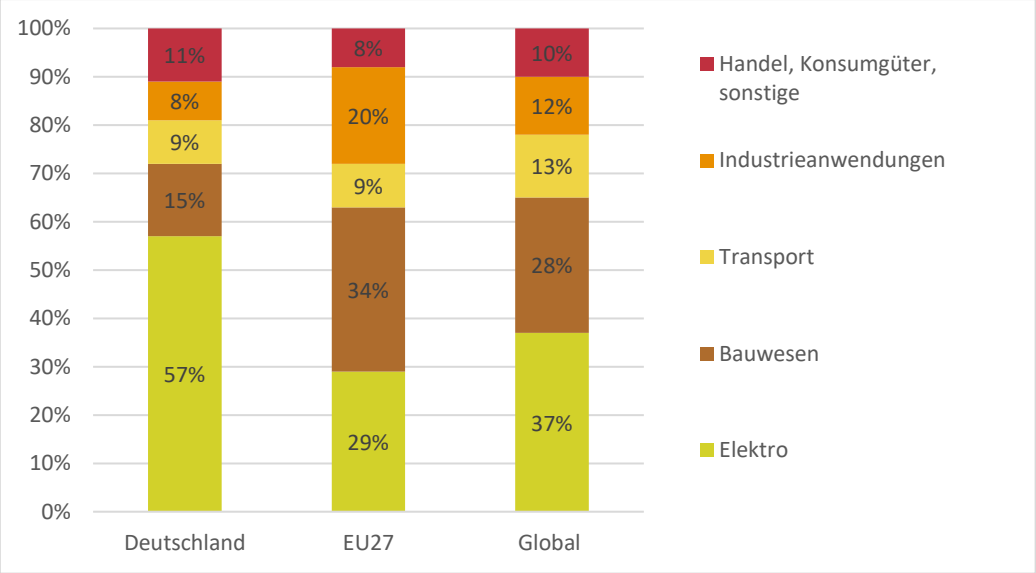
nicht-metallischen Mineralien (wie Sand und Gesteinskörnungen) dominieren die Bruttoanlageinvestitionen, da nicht-metallische Mineralien vor allem in der Verkehrsinfrastruktur für den Straßenbau sowie für den Bau von Gebäuden genutzt werden. Diese werden vergleichsweise weniger durch private Haushalte konsumiert. Die Metalle bilden in etwa den Durchschnitt ab und werden zu 54 Prozent durch den Konsum der privaten Haushalte, zu sieben Prozent durch den Konsum des Staates und zu 39 Prozent durch die langfristigen Bruttoanlageinvestitionen bestimmt. (ifeu 2023; Lutter et al. 2022)

Kupfer

Aktuelle Nutzung von Primärkupfer in Deutschland, der EU27 und Global

Kupfer hat nach Silber die zweithöchste Leitfähigkeit von Wärme und Elektrizität. Zusätzlich besitzt es weitere Eigenschaften, wie gute Formbarkeit und Korrosionsbeständigkeit. Daher kann es in vielen Bereichen eingesetzt werden (Dorner 2020a), so zum Beispiel bei der Erzeugung von Strom und dessen Transport zum Endverbraucher, in diversen Elektroinstallationen in Gebäuden, in Elektrogeräten oder der Bordelektronik von Fahrzeugen (Straße und Luft), ebenso wie in Oberleitungen im Schienenverkehr. Das Metall kommt aufgrund seiner guten thermischen Leitfähigkeit auch als Wärmetauscher zum Einsatz und verbessert die Wärmeableitung bei Stromkabeln. (Gilsbach und Dorner 2020) Kupfer gilt daher als ein zentraler Werkstoff für die Umsetzung der Energie- und Mobilitätswende (DERA 2023a). Abbildung 4 zeigt die Verwendung von Kupfer für Deutschland, die EU27 und global für das Jahr 2020.

Abbildung 4: Verwendung von Kupfer in Deutschland, EU27 und Global 2019/2020 nach Anwendungsbereichen



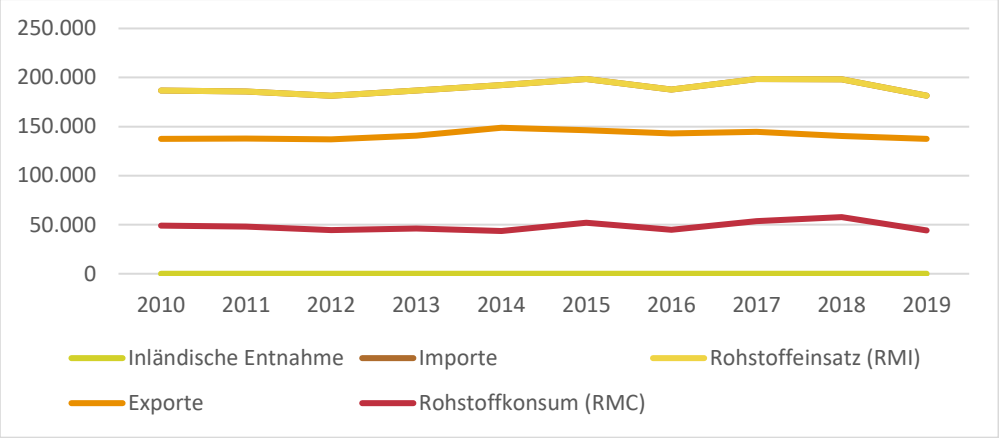
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von JRC 2023a; WVMetalle 2021; Gilsbach und Dorner 2020 auf Basis von ICA 2019 und Roskill 2019

In Deutschland stellt der Bereich der Elektronik mit 57 Prozent die dominierende Anwendung dar. Hierunter fallen Kabel, Leitungen, Drähte, Steckverbinder, Transformatoren, Leiterplatten und Batterien, die allesamt Kupfer enthalten[1]. Auch in der EU27 und global ist dieser Bereich mit 29 Prozent bzw. 37 Prozent von zentraler Bedeutung, dicht gefolgt vom Bauwesen. Hier ist Kupfer v.a. in Fassaden und Rohren für den Heizungs- und Sanitärbereich verbaut, aber auch in Form von Drähten enthalten, sodass der Übergang zum Elektrobereich fließend ist (15 Prozent in Deutschland). Der Automobil- und Transportsektor (je neun Prozent in Deutschland und der EU27 und 13 Prozent global) umfasst u.a. die E-Mobilität als wichtigsten Bereich, aber auch den Schienenverkehr und die Schifffahrt. Der Maschinen- und Anlagenbau sowie die Nutzung von Kupfer in Konsumgütern, wie etwa weißer Ware, also Haushaltsgeräten wie Kühlschränken oder Waschmaschinen, oder elektronischen Werkzeugen und in Münzen (Sonstige), nehmen je nach Region weitere zehn bis 20 Prozent ein. (Dorner 2020a; Gilsbach und Dorner 2020; JRC 2023a)

2019 wurden in Deutschland ca. 44 Mio. t Kupfer (mit Rucksack) konsumiert. (ifeu 2023) Die Verwendung von Kupfer in Deutschland ist in den letzten zehn Jahren leicht gesunken (DERA 2023b; Dorner 2020b); im Vergleich zu 2010 liegt die RMC etwa elf Pozent niedriger. Dies ist weitestgehend auf eine leicht abnehmende Tendenz bei den kupferhaltigen Importen zurückzuführen, während die Exporte auf dem gleichen Niveau geblieben sind. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Kupferextraktion in Deutschland (inländische Entnahme; keine Bergwerksförderung in Deutschland), der Importe (IMP) und Exporte (EXP) sowie des Rohstoffeinsatzes (RMI) und des Rohstoffkonsums (RMC) in Deutschland von 2010 bis 2019 in Rohmaterialäquivalenten, also inklusive der Materialvorketten. (ifeu 2023) Deutschland ist aktuell der weltweit viertgrößte Importeur von Kupfer als Primärrohstoff. (DERA 2023b)

[1] Hinweis: Aufgrund der Zuordnung von Kupfer-Kabel, Draht und Leitungen zur Kategorie Elektro bei VW Metalle (2021), die u.a. auch im Bauwesen zum Einsatz kommen, ist davon auszugehen, dass der deutsche Anteil von Kupfer im Bauwesen auf einem ähnlichen Niveau wie in der EU27 liegt.

Abbildung 5: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Kupfer in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis des DeuRess Modells (ifeu 2023)

Deutschland hat nach China und den USA den drittgrößten Kupferbedarf, was die große Bedeutung der deutschen Kupferindustrie im weltweiten Vergleich widerspiegelt. Der Bedarf wird einerseits durch die Erzeugung aus Kupfererzen in primären und sekundären Kupferhütten und andererseits durch Importe des Metalls gedeckt. Bei der Kupfererzeugung in Deutschland liegt der Anteil an Sekundärmaterial mit 40 Prozent deutlich über dem globalen Durchschnitt. (BGR 2021; Gilsbach und Dorner 2020)

Auch auf EU27-Ebene zeichnet sich ein ähnliches Bild ab: Der Kupferkonsum ist mit elf Prozent leicht gesunken. (Eurostat 2023; ifeu 2022; JRC 2023a) Dies lässt sich auf eine Zunahme von Exporten (plus 15 Prozent), bei sinkenden Importen (minus sieben Prozent) zurückführen. Zwar steigt die inländische Extraktion in der EU um etwa 27 Prozent, liegt aber insgesamt auf einem geringeren Niveau als die Handelsmengen. (Eurostat 2023; ifeu 2022) Die weltweiten Hauptproduzenten von Kupfererz (Bergwerksförderung) sind Chile (28 Prozent), Peru (zwölf Prozent) und China (acht Prozent). (European Commission 2023)

Die deutsche Raffinadeproduktion lag 2022 bei 609 Mio. Tonnen. Etwa 245 Mio. Tonnen Sekundärkupfer wurden hierbei eingesetzt, was eine Rezyklateinsatzquote (engl. Recycling Input Rate, kurz: RIR) von gut 40 Prozent bedeutet. Diese Quote ist in den letzten Jahren konstant. Würde die Direkteinschmelzung von Schrotten in der Halbzeugfertigung mitberücksichtigt, läge die Rate noch weitaus höher. Das Deutsche Kupferinstitut nennt eine RIR von 45 Prozent. Auf europäischer Ebene liegt bei ausschließlicher Betrachtung von End-of-Life (EoL) Schrotten die EoL RIR vergleichsweise niedrig bei 30 Prozent. (DERA 2023a; b; JRC 2023a)

Für die Europäische Kommission ist Kupfer ein strategischer Rohstoff und wird in sehr großen Mengen (20 Mio. Tonnen im Jahr 2020 für die EU) für die Elektrifizierung in allen strategischen Technologien verwendet. Die Kupferversorgung ist zwar sehr gut diversifiziert, weshalb Kupfer von der EU lange nicht als kritischer Rohstoff eingestuft wurde; aufgrund der limitierten Substituierbarkeit in elektrischen Anwendungen nahm die Europäische Kommission das Metall jedoch 2023 in die Liste auf. Für die EU wurde eine Importabhängigkeit für Primärkupfer von 48 Prozent in 2020 berechnet. (European Commission 2023)

Umweltwirkung der Extraktion und erste Verarbeitung

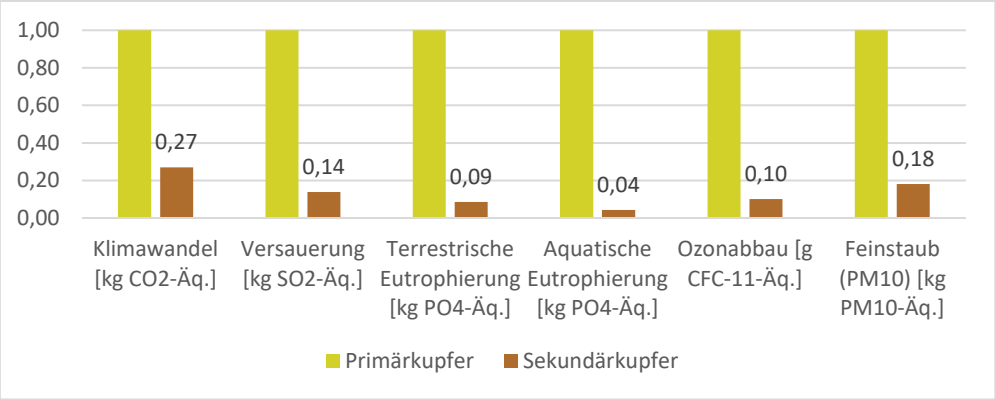
Primärkupfer wird zu etwa 80 Prozent aus sulfidischen und zu 20 Prozent aus oxidischen Erzen gewonnen. (Dorner 2020b) Die Prozessführung unterscheidet sich je nach Ausgangsmaterial stark. Bei der Verwendung von oxidischen Kupfererzen kommen hydrometallurgische Gewinnungsmethoden zum Einsatz, bei sulfidischem Erz eine pyrometallurgische Produktion. Letztere verursacht im Vergleich zur hydrometallurgischen Route aufgrund des hohen Energieeinsatzes mehr Treibhausgase. (Dittrich et al. 2022)

Für die primäre Herstellung von Kupfer wird durchschnittlich eine spezifische Energie von 30 bis 90 MJ pro Kilogramm benötigt; der größte Anteil (70 Prozent) fällt auf den Bergbau, das Mahlen und die Flotation. Der Wasserbedarf für die Verarbeitung der Erze zu Metall beläuft sich durchschnittlich auf 172.000 Liter pro Tonne Kupfer. (Dorner 2020b; UNEP 2013)

Kupferrecycling hat aufgrund des hohen Rohstoffpreises bereits seit Langem eine große Bedeutung. Sekundärkupfer zeigt keinerlei Qualitätsminderungen gegenüber Primärkupfer auf. Die Aufwendungen für das Kupferrecycling hängen von der Art des Altkupfers ab: Sortenreine Kupferschrotte werden direkt eingeschmolzen und zu Halbzeugen verarbeitet, ohne zusätzliche Aufbereitung in einer Kupferhütte. Bei stärkeren Verunreinigungen werden die Kupferschrotte (mehr als 90 Prozent Reinheit) einer Feuerraffination unterzogen und dann zusammen mit Primärkupfer durch Elektrolyse raffiniert. Bei noch stärkerer Verunreinigung kommen zudem mechanische Aufbereitungsschritte hinzu. (DERA 2023a; Winnacker und Küchler 2006)

Die Energieeinsparung der sekundären Kupferproduktion gegenüber der primären Produktion entspricht 84 bis 88 Prozent, sodass das Recyceln von Kupfer mit einer deutlich verringerten Treibhausgasemission verbunden ist. (Dorner 2020b; UNEP 2013) Auch mit Hinblick auf weitere Umweltwirkungen ist die Recyclingroute der Primärverarbeitung deutlich überlegen (siehe Abb. 7). Abbildung 6 zeigt die Verminderung der Umweltwirkungen pro Tonne Sekundärkupfer aus Schrott im Vergleich zu den Umweltwirkungen einer Tonne Primärkupfer aus Erz. In allen Kategorien werden die geringeren Umweltbelastungen des recycelten Kupfers deutlich.

Abbildung 6: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär- und Sekundärkupfer je Tonne [Index 1 = Primärkupfer]



Quelle: Daten aus Ecoinvent (Version 3.7); Primärkupfer wird durch „copper production, cathode, solvent extraction and electrowinning process“ und Sekundärkupfer durch den Datensatz "treatment of copper scrap by electrolytic refining" dargestellt (Dittrich et al. 2022)

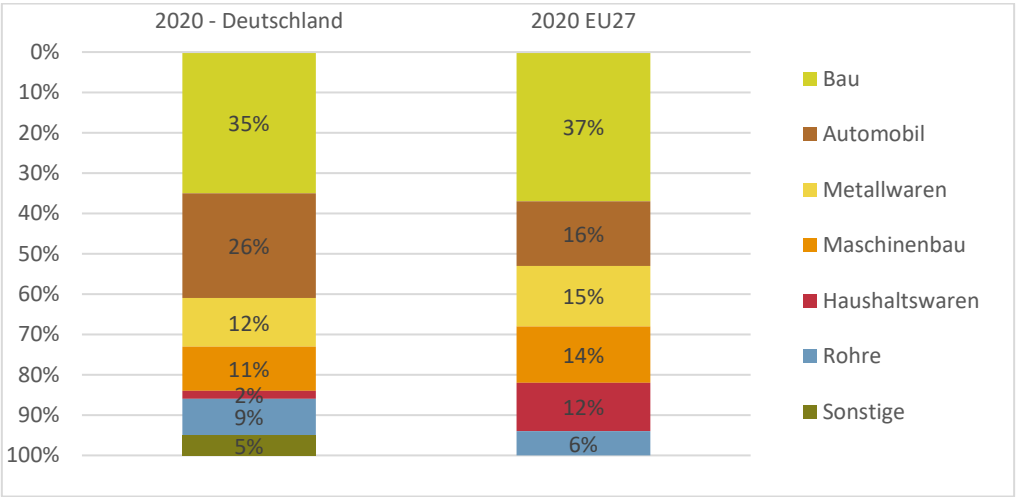
Eisen und Stahl

Aktuelle Nutzung von Primäreisen in Deutschland, der EU27 und Global

Eisen ist das am vierthäufigsten vorkommende Element in der Erdkruste und der Hauptbestandteil von Stahl. Im Vergleich zu anderen Metallen sind Eisen- und Stahlprodukte günstig in ihrer Gewinnung und Herstellung. Eisen zeichnet sich durch seine ferromagnetischen Eigenschaften und – weiterverarbeitet zu Stahl – seine hohe Stabilität und Robustheit aus. (DERA o.J.) Durch das Spektrum an möglichen Legierungen können die Eigenschaften des Stahls weiter differenziert werden, was eine große Bandbreite an Anwendungen ermöglicht. Eisen- und Stahlprodukte finden sich vor allem in Infrastrukturen für den Bau von Häusern, Brücken und Schienen sowie in Fahrzeugen, Zügen und Schiffen wieder. Sowohl in Deutschland als auch in der EU ist die Baubranche der größte Abnehmer von Stahlprodukten, gefolgt von der Automobilindustrie (siehe Abbildung 7). In Deutschland liegt der Anteil der Automobilindustrie als Verwendungssektor (26 Prozent) deutlich über dem Anteil in der EU (16 Prozent). (DERA o.J.)

Ein Drittel des Stahls fließt in die Produktion von Metallwaren, Haushaltswaren und Rohren. Letztere sind z.B. für Wasserleitungen oder zum Transport sonstiger Flüssigkeiten als Konstruktionselement essentiell. (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020)

Abbildung 7: Verwendung von Stahl in Deutschland und der EU27, 2020



Quelle: Wirtschaftsvereinigung Stahl 2020; JRC 2023b

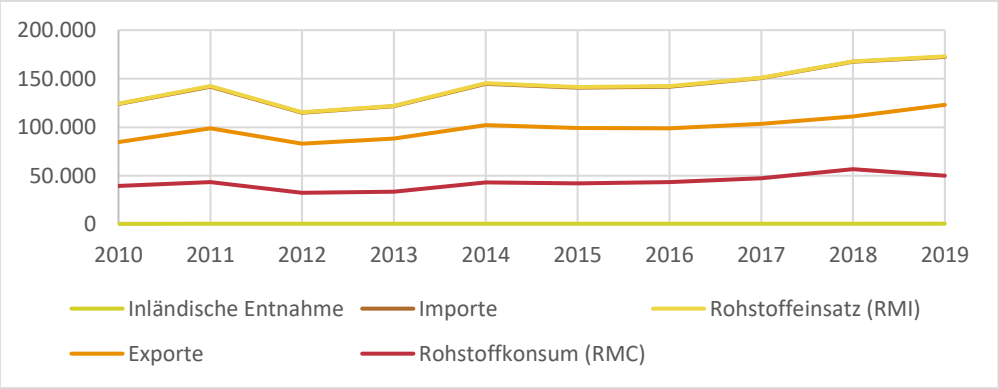
Weltweit wird ein Drittel des Stahls für Gebäude genutzt, ein Fünftel für Infrastrukturen für den Verkehr benötigt und ein weiteres Fünftel für mechanische und elektrische Ausrüstungen eingesetzt. Für Fahrzeuge werden 14 Prozent, für Konsumgüter und Verpackungen etwa 13 Prozent des globalen Stahls genutzt. (IEA 2020)

Innerhalb Deutschlands werden jährlich lediglich 0,5 Mio. Tonnen Eisenerz entnommen (DERA o.J.); der Rohstoffeinsatz ist daher durch die importierten Eisenmengen bestimmt, die sich 2019 auf ca. 170 Mio. Tonnen RME belaufen. Etwa 70 Prozent des global geförderten Eisenerzes stammen aus Australien, Brasilien und China. (DERA o.J.)

Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der Eisenimporte und -exporte sowie den Rohstoffeinsatz (RMI) und die Verwendung in Rohmaterialäquivalenten (RME) für Deutschland ab 2010.

2019 lag der Rohstoffeinsatz von Eisen bei etwa 170 Mio. Tonnen RME und ist damit im Vergleich zu 2010 um 50 Mio. Tonnen gestiegen. Der Rohstoffkonsum (RMC) liegt 2019 bei knapp 50 Mio. Tonnen RME und damit etwa 15 Prozent über dem Niveau in 2010.

Abbildung 8: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Eisen in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME



Quelle: eigene Berechnungen auf Basis des DeuRess Modells (ifeu 2023)

In der EU27 werden in Schweden mit über 90 Prozent die größten Mengen Eisenerz extrahiert, etwa sieben Prozent stammen aus Österreich und knapp ein Prozent aus Deutschland. In 2020 wurden EU-weit insgesamt etwas mehr als 40 Mio. Tonnen Eisenerz gewonnen. (Eurostat 2023; ifeu 2022; JRC 2023b) Gegenüber 2010 ist die inländische Entnahme in der EU damit um knapp 38 Prozent gestiegen. Die Importmengen liegen aktuell auf dem gleichen Niveau wie vor zehn Jahren, die Exporte hingegen sind um 25 Prozent gestiegen, sodass der Rohstoffkonsum insgesamt in 2020 mit neun Prozent deutlich unter dem Niveau von 2010 liegt. 2019 lag der RMC mit etwa 160 Mio. Tonnen RME allerdings noch auf dem gleichen Niveau wie 2010. (Eurostat 2023; ifeu 2022)

Die aktuellen Produktionswerte in reinen Produktgewichten konstatieren für Deutschland eine Roheisenproduktion von 23,7 Mio. Tonnen. Rohstahl wurde knapp 37 Mio. Tonnen produziert, davon 26 Mio. Tonnen über Hochöfen und elf Mio. Tonnen über Elektrolichtbogenöfen. Deutschland ist 2022 der weltweit achtgrößte Stahlhersteller sowie – trotz sinkender Produktion gegenüber 2021 – weiterhin der größte Stahlhersteller in der EU27. Die Edelstahlproduktion umfasste 2021 etwa 0,43 Mio. Tonnen. (DERA 2023b)

Gemäß JRC liegt die Importabhängigkeit der EU27 für Eisenerz im Fünf-Jahres-Mittel 2016 bis 2020 bei 77 Prozent, die von verarbeitetem Eisen bzw. Stahl bei lediglich fünf Prozent. (JRC 2023b)

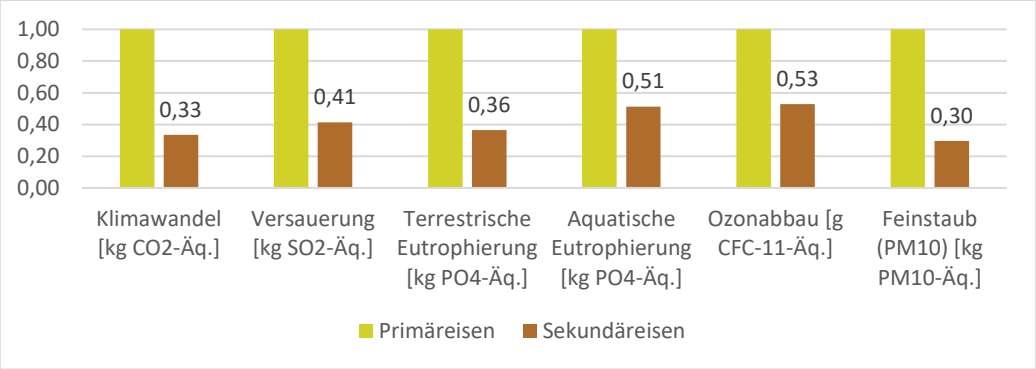
Umweltwirkung der Extraktion und erste Verarbeitung

70 Prozent des Rohstahls werden in Deutschland über die Hochofen-Route (Blast Furnace) produziert. Im kontinuierlich arbeitenden Hochofen werden Eisenerz und Koks übereinandergeschichtet und mit Sauerstoff bei bis zu 2.000°C zur Reaktion gebracht. Das unten am Hochofen entstehende Roheisen wird abgestochen und Schlacke und Gichtgas werden abgeführt. Im Konverter werden dann bei rund 1.200°C unerwünschte Begleitelemente wie Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Mangan und Silicium abgespalten. Die Eigenschaften des entstehenden Rohstahls können über Beimischungen anderer Elemente veredelt werden. Etwa fünf Mio. t Stahlschrott (ca. 30 Prozent) wurden 2019 über die Hochofen-Route eingesetzt, vor allem zur Temperaturregulierung im Konverter. (DERA 2023b, o.J.)

Die Erzeugung von Primärstahl über die Hochofen-Route ist energieintensiv und verursacht trotz sehr guten technischen Voraussetzungen in Deutschland etwa zwei Tonnen CO_2 pro Tonne Rohstahl. Wasserstoff ist ein alternatives Reduktionsmittel, welches die Prozessemissionen technisch um maximal ca. 20 Prozent reduzieren kann. Ein völliger Verzicht auf Kokskohle ist im Hochofen jedoch technisch nicht möglich. (BGR 2022)

Die restlichen 30 Prozent des Rohstahls werden in Deutschland über Elektrolichtbogenöfen erzeugt. Bei diesem Verfahren werden 100 Prozent sekundäre Rohstoffe genutzt und Stahlschrott über elektrische Energie wiedereingeschmolzen. Meist werden zusätzlich fossile Brennstoffe zugeführt, um die Energiestromdichte zu steigern. Zur Abtrennung von Störstoffen werden Sauerstoff, Erdgas und häufig Kalk injiziert; die Schlacke wird durch den Rohstahlabstich schließlich abgetrennt. Der Energieverbrauch dieser Sekundärroute liegt gegenüber der primären Produktionsroute um etwa 70 Prozent niedriger. (EuRIC 2020) Auch weitere Umweltwirkungen der Sekundärroute liegen folglich deutlich niedriger als bei der Primärstahlherstellung, wie in Abbildung 9 illustriert ist.

Abbildung 9: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär und Sekundäreisen je Tonne [Index 1 = Primäreisen]



Hinweis: Primäreisen mit Hochofenroute und Sekundäreisen mit Elektrostahlroute.
Quelle: Daten aus Ecoinvent (Version 3.7.1); Primäreisen wird durch „market for pig iron, RER“ und Sekundäreisen durch folgenden Datensatz "steel production, electric, low-alloyed" dargestellt (Dittrich et al. 2022)

Bei den spezifischen CO_2 Emissionen werden pro Tonne Rohstahl aus dem Elektrolichtbogenofen (0,4 bis 0,6 Tonne CO_2 pro Tonne Stahl) im Vergleich zur Hochofenroute (ca. 1,7 Tonnen CO_2 pro Tonne Stahl) über eine Tonne CO_2 vermieden. 2022 wurden durch die Produktion von elf Mio. Tonnen Rohstahl via Elektrostahlroute in Deutschland daher mindestens zwölf Mio. Tonnen CO_2-Emissionen eingespart. Die spezifischen THG-Einsparungen bei Edelstählen liegen aufgrund der Legierungselemente (Nickel, Chrom und Molybdän) mit ca. 4,5 Tonnen CO_2 pro Tonne Edelstahlschrott noch höher. Laut (BDSV 2018; Fraunhofer UMSICHT 2016) werden zudem pro Tonne Sekundärstahl ca. 1,4 Tonnen Eisenerz, 0,8 Tonnen Kohle, 0,3 Tonnen Kalkstein und Zusatzstoffe vermieden. Die Verwendung von Stahlschrott zur Herstellung von neuem Stahl reduziert – im Vergleich zur Primärroute – die Luftverschmutzung um 86 Prozent, den Wasserverbrauch um 40 Prozent und die Wasserverschmutzung um 76 Prozent. (BDSV 2018; Fraunhofer UMSICHT 2016)

Gemäß den derzeitigen Stahlschrottmengen, die in Deutschland zur Rohstahlherstellung eingesetzt werden, wird eine Recycling-Input-Rate von 45,8 Prozent erzielt. Für die EU liegt die Rate sogar noch höher bei 56 Prozent. Global stammen – Stand 2017 – etwa 35 Prozent der Stahlprodukte aus recyceltem Stahlschrott. (BDSV 2018; DERA 2023b; EuRIC 2020)

Aluminium

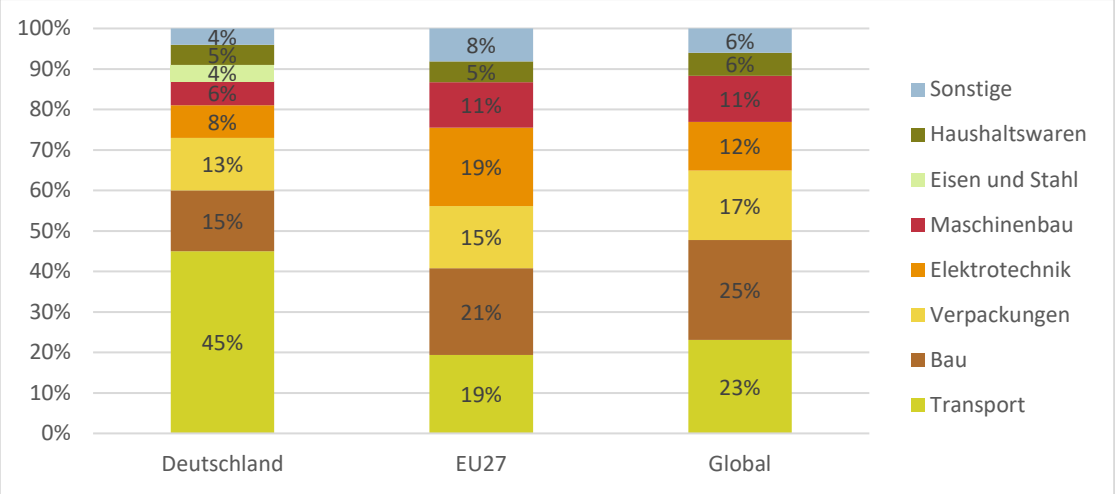
Aktuelle Nutzung von Primäraluminium in Deutschland, der EU27 und Global

Aluminium ist das metallische Element, das aus Bauxit gewonnen wird. Es ist mit einem Anteil von acht Gewichtsprozent (vor Eisen) das dritthäufigste Element der Erdkruste. Aluminium zählt mit seiner geringen Dichte von ca. 2,7 Gramm pro cm^3 zu den Leichtmetallen und findet in der Industrie entsprechend häufig dort Anwendung, wo Gewichtseinsparungen von Bedeutung sind und gleichzeitig eine hohe Festigkeit und Langlebigkeit benötigt wird. Reines Aluminium besitzt zudem eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Durch das Legieren von Rohaluminium mit verschiedenen Elementen wie Magnesium (Mg), Silizium (Si), Mangan (Mn), Kupfer (Cu) oder Zink (Zn), können verschiedenste Eigenschaften erzielt werden, sodass Aluminium insgesamt ein sehr breites Spektrum an Anwendungen hat. (DERA 2023b, o.J.)

Insgesamt werden etwa 200 verschiedene Aluminiumlegierungssorten verwendet. Die Kenntnis über die Legierungszusammensetzung und Werkstofferkennung spielt bei der Aufbereitung der Aluminiumschrotte eine große Bedeutung. Grundsätzlich wird zwischen Hüttenaluminium (mehr als 99 Prozent Aluminiumanteil), Aluminiumknetlegierungen (Aluminium etwa 97 Prozent) und Aluminiumgusslegierungen (Aluminiumanteil größer als 87 Prozent) unterschieden. (UBA 2019)

Aluminium wird überwiegend im Automobil- und Transportsektor eingesetzt, wo hohe Tragfähigkeiten bei geringem Gewicht gefordert sind. In Deutschland ist es rund die Hälfte des verwendeten Aluminiums, das zum Bau von PkW, LkW, Bahnen, Schiffen und Flugzeugen eingesetzt wird (siehe Abbildung 10). (DERA o.J.) In der EU und auch global nimmt die Bauindustrie ein Fünftel bzw. ein Viertel der Aluminiumverwendung ein (z.B. als Fassaden, Dach- und Wandsysteme, Fenster, Türen, Balkone oder zur Innenraumgestaltung). Weiterhin spielt Aluminium eine große Bedeutung für Anwendungen in der Elektro- und Konsumgüterindustrie, dem Maschinenbau und in der Verpackungsindustrie (z.B. in Getränke- und Konservendosen). (DERA 2023a) In Maschinen- und der Elektrotechnik ist Aluminium beispielsweise in Gehäusen von Elektromotoren, Hoch- und Niederspannungskabeln, Stromschienen, Kondensatoren, Freileitungsseilen oder Antennen zu finden. (Aluminium Deutschland e. V. 2023)

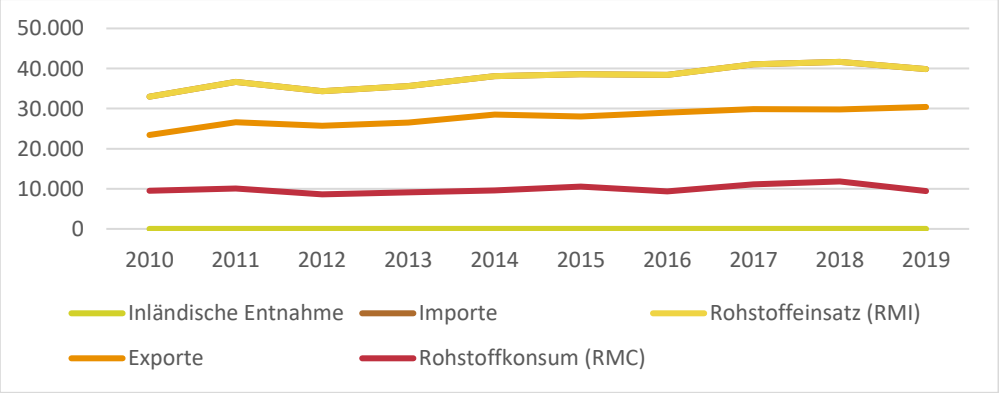
Abbildung 10: Anwendungen von Aluminium in Deutschland, EU27 und Global in 2019/2020



Quelle : (CRU International Ltd 2022; European Commission 2023; WVMetalle 2021)

In Deutschland gibt es keine Bergbauproduktion von Bauxit. Deutschland ist vollständig auf den Import des aluminiumhaltigen Erz Bauxit angewiesen, welches mit ca. 90 Prozent überwiegend aus Guinea stammt. (BGR 2022) Die Importmengen von Aluminium sind seit 2010 um 20 Prozent auf knapp 40 Mio. Tonnen RME angestiegen. Der Export verläuft ähnlich konstant wie die Importe und liegt 2019 bei 30 Mio. Tonnen RME, was einer Zunahme von 30 Prozent gegenüber 2010 entspricht. Der Rohstoffkonsum von Aluminium liegt in Deutschland bei knapp zehn Mio. Tonnen RME, das sind ca. 110 Kilogramm RME pro Person.

Abbildung 11: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Aluminium in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME



Quelle: ifeu eigene Berechnungen auf Basis des DeuRess Modells (ifeu 2023)

In der EU27 wird Bauxit in Griechenland abgebaut. Fast 90 Prozent der Bauxitgewinnung in der EU erfolgt dort. Die ungarische Extraktion wurde in den letzten Jahren eingestellt. Geringe Mengen Bauxit werden zudem noch in Frankreich (zehn Prozent) und Kroatien (ein Prozent) abgebaut. 2020 wurden insgesamt 1,6 Mio. Tonnen RME Bauxit in der EU27 entnommen, etwa 40 Prozent weniger als noch in 2010, weitestgehend bedingt durch die auslaufende ungarische Entnahme sowie eine Verminderung der Extraktion in Griechenland. (JRC 2023c) Die Aluminiumimporte in der EU27 sind stufenweise angestiegen und liegen 2020 etwa 20 Prozent über dem Niveau von 2010. Die global größten Extraktionsländer von

Bauxit sind Australien (27 Prozent), Guinea (23 Prozent) und China (18 Prozent). (JRC 2023c) Aluminiumexporte liegen mengenmäßig etwa halb so hoch wie die Importe, sind vergleichsweise aber mit einem Faktor 1,35 gegenüber 2010 deutlich stärker angestiegen. Der Rohstoffkonsum unterlag in den letzten Jahren Schwankungen und liegt 2020 etwa sechs Prozent über dem Wert von 2010. (Eurostat 2023; ifeu 2022; JRC 2023c)

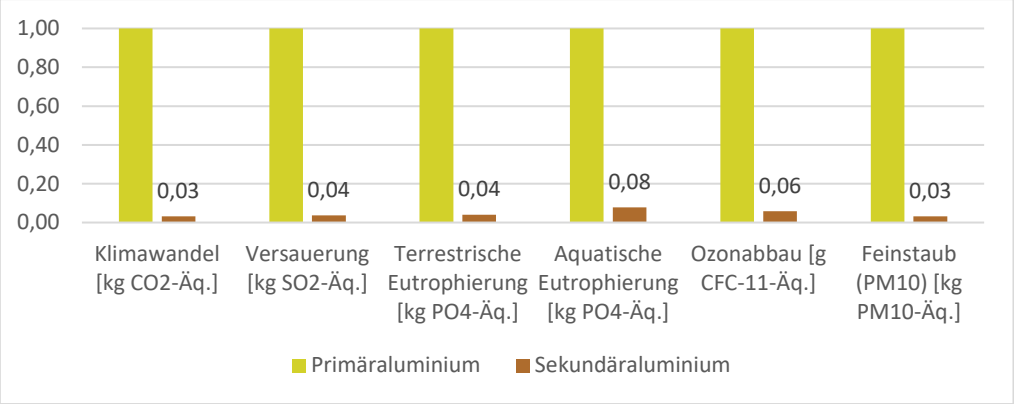
Deutschland verfügt sowohl über eine große primäre als auch sekundäre Verarbeitung von Aluminium. In reinen Produktgewichten betrachtet wurden 2022 neben ca. 0,34 Mio. Tonnen primärem Rohaluminium auch drei Mio. Tonnen Recyclingaluminium produziert. Etwa 85 Prozent davon wurden aus dem Umschmelzen von Neu- bzw. Produktionsschrotten erzeugt, etwa 15 Prozent (ca. 0,42 Mio. Tonnen) davon waren Raffinade. Bezogen auf die Raffinade beträgt der Anteil von Sekundäraluminium damit etwa 58 Prozent (0,42 Mio. Tonnen von 0,76 Mio. Tonnen Rohmetall). (DERA 2023b) Die EoL-Recycling-Input-Rate der EU27 liegt bei etwa 21 Prozent. (JRC 2023c) Es wird davon ausgegangen, dass bei stärkerer Verwendung des Aluminiumschrotts, der derzeit in Länder außerhalb der EU exportiert wird, eine Verringerung der Primäraluminiumimporte in die EU um etwa 24 Prozent möglich sei und damit auch der Anteil des Sekundärmetalls gesteigert würde. (EuRIC 2020) Dies erfordert aber eine Zunahme der Recyclingkapazitäten, die auch in Deutschland noch nicht ausreichend sind. (DERA 2023b; UBA 2019; WVMetalle 2021) Gemäß JRC liegt die Importabhängigkeit der EU27 für Bauxit im Fünf-Jahres-Mittel 2016 bis 2020 bei 89 Prozent, die von verarbeitetem Aluminium bei 58 Prozent. (JRC 2023c)

Umweltwirkung der Extraktion und erste Verarbeitung

Von der Lagerstätte bis zum reinen Metall sind bei der Aluminiumverarbeitung aufwendige und energieintensive Verfahren notwendig. Das Bauxiterz wird zunächst gelaugt, um im sogenannten Bayer-Verfahren Tonerde (bzw. Aluminiumoxid) zu gewinnen. Diese wird durch hohen Energieeinsatz während der Schmelzflusselektrolyse in Primäraluminiumhütten in reines Aluminium (Hüttenaluminium) umgewandelt. Dieses hat eine Reinheit von über 99 Prozent. Für eine Tonne Primäraluminium braucht es etwa fünf bis sieben Tonnen Bauxit. Gleichzeitig fallen pro Tonne Hüttenaluminium ein bis drei Tonnen giftiger Rotschlamm als feste Prozessrückstände an. (Vasters und Franken 2020) Für die primäre Herstellung von einer Tonne Aluminium werden etwa 200 MJ benötigt. Das entspricht in etwa dem doppelten Energiebedarf der Kupferproduktion und in etwa dem zehnfachen Bedarf der Eisenproduktion. (DERA 2023b, o.J.)

Das Recyceln von Aluminium birgt verglichen mit der primären Aluminiumproduktion erhebliche ökologische Vorteile. Für Sekundäraluminium wird aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur lediglich fünf Prozent der Energie verbraucht, die für die Herstellung derselben Menge Aluminium aus Bauxit nötig ist. (EuRIC 2020; Vasters und Franken 2020) Durch die Verwendung von Aluminiumschrott können THG-Emissionen um ca. 93 Prozent im Vergleich zu Rohaluminium reduziert werden. Auch hinsichtlich weiterer Umweltwirkungskategorien besticht Sekundäraluminium durch deutlich geringere Umweltwirkungen, wie in Abbildung 12 illustriert ist. Eine Tonne recyceltes Aluminium spart zudem bis zu acht Tonnen Bauxit, 14.000 kWh Energie und 7,6 m³ Deponievolumen ein. (EuRIC 2020)

Abbildung 12: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär und Sekundäraluminium je Tonne [Index 1 = Primäraluminium]



Quelle: Daten aus Ecoinvent (Version 3.7.1); Primäraluminium wird durch Mix "market for aluminium, primary, ingot" aus verschiedenen Regionen: 15 Prozent IAI Area, EU27 & EFTA, 85 Prozent RoW und Sekundäreisen durch folgenden Datensätze "treatment of aluminium scrap, new, at remelter","treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at remelter", "treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner", "treatment of aluminium scrap, new, at refiner" aus verschiedenen Regionen: 28 Prozent RER, 72 Prozent RoW dargestellt (Dittrich et al. 2022)

Herausfordernd bei der Aufbereitung von Aluminiumschrotten ist der unedle Charakter des Metalls, wodurch die Begleitelemente – welche i.d.R. edler sind – im Aluminium verbleiben und nicht durch Schmelzraffination abgetrennt werden können. Daher sind Sortiertechnologien von großer Bedeutung, um die sich grundlegend unterscheidenden Gusslegierungen von den Knetlegierungen zu trennen und gesondert zu recyceln.

Die Behandlung der Schrotte erfolgt entweder durch mechanische Aufbereitung – z.B. magnetische Verfahren zur Sortierung – oder durch Einschmelzen. Beim Schmelzen von Knetlegierungsschrotten ist der Grad der Verunreinigung zu berücksichtigen. Bei niedrigen Verunreinigungen kann eine direkte Einschmelzung des Schrotts erfolgen, wohingegen stärker verunreinigte Schrotte in Schmelzhütten gereinigt und ggf. unter Zugabe von primärem Aluminium weiterverarbeitet werden. Gussschrotte und stark verunreinigte Knetlegierungsschrotte werden in Schmelzwerken eingesetzt um Gusslegierungen herzustellen, welche im Vergleich zu Knetlegierungen höhere Legierungsbestandteile aufweisen. (Martens 2012)

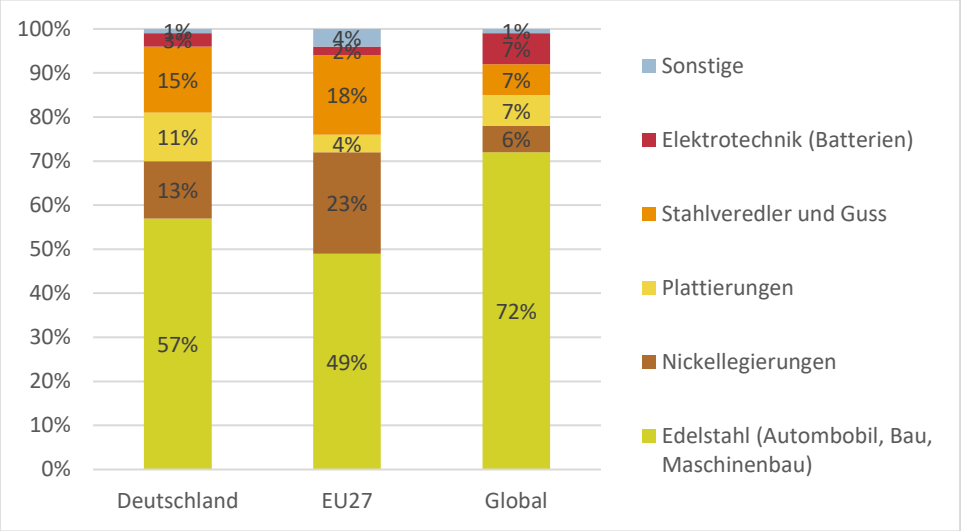
Nickel

Aktuelle Nutzung von Primärnickel in Deutschland, der EU27 und Global

Die bis heute deutlich dominierende Verwendung von Nickel liegt in der Edelstahlindustrie und der Stahlveredelung. Nickellegierungen werden in verschiedenen Hightech-Industrien aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit, der Warmfestigkeit und der guten Verformbarkeit genutzt. Die Verwendung in Edelstahl, als Stahlveredler oder als Nickellegierung nimmt in Deutschland mehr als 75 Prozent der gesamten Verwendung im Jahr 2020 ein. In der EU27 und global lässt sich ein ähnliches Bild zeichnen (siehe Abbildung 13). Nickelplattierungen sind ein weiteres Anwendungsfeld mit ca. elf Prozent Anteil in Deutschland und sieben Prozent in der EU und global. (Vasters et al. 2021)

Nickel wird bereits seit langem in handelsüblichen Batterien verwendet, vor allem in Nickel-Cadmium-Batterien (NiCd) und in den wieder aufladbaren Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH). Mittlerweile steigt die Bedeutung von Nickel als Kathodenrohstoff in Lithium-Ionen-Batterien (NMC-622 und NMC-811) für die Elektrifizierung des Transportsektors, insbesondere aufgrund der hohen Energiedichte und Speicherkapazität im Vergleich zu anderen Li-Ionen Varianten und dem Trend zu niedrigeren Cobalt-Gehalten. (Marscheider-Weidemann et al. 2021; Nickel Institute 2023) Der Status Quo zeigt jedoch eine noch deutlich untergeordnete Rolle der Verwendung von Nickel in Batterien im Vergleich zur Verwendung in der Edelstahlindustrie, schließlich liegt der Anteil bei drei Prozent in Deutschland, vier Prozent in der EU27 und sieben Prozent weltweit. (SCRREEN 2023; WVMetalle 2021)

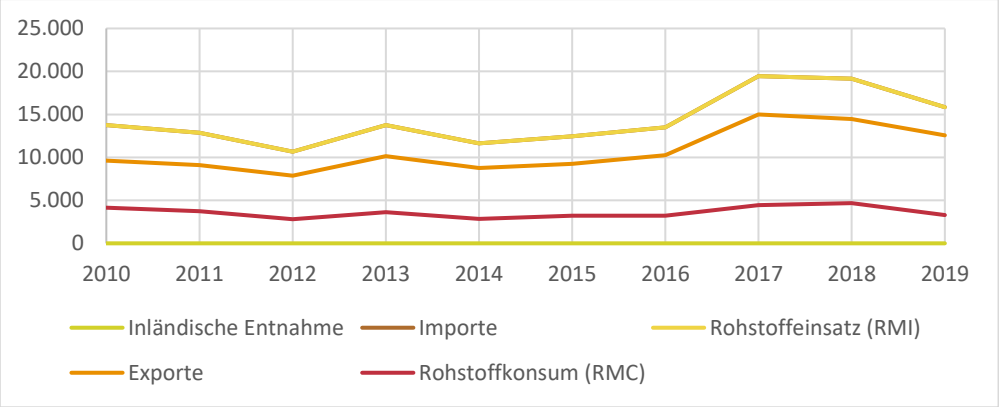
Abbildung 13: Verwendung von Nickel in Deutschland, EU27, und Global 2020 nach Bereichen



Quelle: (SCRREEN 2023; WVMetalle 2021)

Nickelerz wird nicht innerhalb Deutschlands extrahiert; der Rohstoffeinsatz ist daher durch die importierten Nickelmengen bestimmt. Diese schwanken innerhalb der letzten zehn Jahre leicht; insgesamt ist aber eine Zunahme der Importe und des Rohstoffeinsatzes (RMI) von etwa 15 Prozent zu verzeichnen. Der Verlauf der Exporte orientiert sich folglich an der Entwicklung des Rohstoffeinsatzes. Insgesamt wird 2019 etwa 30 Prozent mehr Nickel exportiert als 2010, was insgesamt zu einer Abnahme des Nickelkonsums (RMC) um etwa 20 Prozent führt. Abbildung 14 zeigt die Entwicklung der Nickel Im- und Exporte sowie den Rohstoffeinsatz und Konsum in Rohmaterialäquivalente. 2019 wurden in Deutschland ca. 3,2 Mio. t Nickel (mit Rucksack) konsumiert. (ifeu 2023).

Abbildung 14: Entwicklung der Rohstoffindikatoren für Nickel in Deutschland, 2010 bis 2019 in kt RME



Quelle: ifeu eigene Berechnungen auf Basis des DeuRess Modells (ifeu 2023)

Auf EU-Ebene zeigt sich ein leicht abweichendes Bild: Die Nickelextraktion wurde in den letzten zehn Jahren trotz Schwankungen kontinuierlich ausgebaut (plus 36 Prozent). Auch die Importe stiegen im gleichen Zeitraum von 2010 bis 2019 um 50 Prozent, was zu einem Rohstoffeinsatz führt, der 44 Prozent über dem von 2010 liegt. Der starke Anstieg der Nickelexporte (plus 57 Prozent) führt zu einem Nickelkonsum, der 2019 etwa um den Faktor 1,3 über dem von 2010 liegt. (Eurostat 2023; ifeu 2022; JRC 2023d)

Für die Europäische Kommission ist Nickel ein strategischer Rohstoff, der als einziges Batteriematerial bislang nicht auf der Liste der kritischen Rohstoffe stand, da die Versorgung in den Bewertungszeiträumen gut diversifiziert war. Nicht wiedergespiegelt waren jedoch die hohe Eigentumskonzentration bei den Projekten, Produktionskapazitäten oder privaten vertraglichen Vereinbarungen – allesamt Faktoren, die zukünftig an Relevanz gewinnen. Daher ist auch Nickel 2023 in die Liste der kritischen Rohstoffe der Europäischen Kommission aufgenommen worden. (European Commission 2023)

Die weltweit wichtigsten Produzenten von Nickelerzen und -konzentraten sind Indonesien (26 Prozent), die Philippinen (14 Prozent), Russland (zehn Prozent), das zu Frankreich gehörende Neukaledonien (neun Prozent), Kanada (acht Prozent), Australien (acht Prozent). Die EU bezieht 39 Prozent aus Finnland, 24 Prozent aus Kanada, 19 Prozent aus Griechenland, acht Prozent aus Südafrika und vier Prozent aus den USA. Die wichtigsten Raffinerien sind in China (33 Prozent), Indonesien (zwölf Prozent), Japan (neun Prozent), Russland (sieben Prozent). Die EU bezieht raffiniertes Nickel zu 29 Prozent aus Russland, zu 18 Prozent aus Finnland, zu elf Prozent aus Norwegen, zu je sieben Prozent aus Kanada und Australien, zu vier Prozent aus Griechenland und darüber hinaus aus weiteren Ländern. (European Commission 2023) Die Importabhängigkeit der EU liegt bei 75 Prozent. Die EoL-RIR liegt derzeit bei 16 Prozent. (European Commission 2023; JRC 2023d)

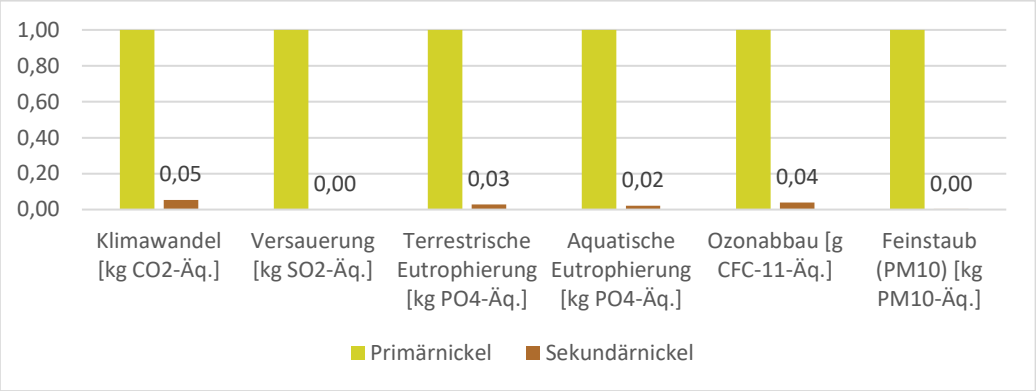
Umweltwirkung der Extraktion und erste Verarbeitung

Wie auch bei Kupfer kann Primärnickel aus der Förderung von sulfidischen oder oxidischen Erzen gewonnen werden. Bei der Förderung aus Sulfid-Erzen wird zunächst die sogenannte Matte durch einen pyrometallurgischen Prozess hergestellt und durch weitere Raffination zur Gewinnung von Klasse 1 Nickel (mind. 99,8 Prozent Reinheit) weiterverarbeitet. Bei Oxid-Erzen wird durch einen pyrometallurgischen Prozess Ferronickel gewonnen, welches einen hohen Eisenanteil aufweist und daher in der Regel in Legierungen eingesetzt wird.

Eine weitere Raffination zu reinem Nickel ist dann nicht erforderlich (BGR 2017; Vasters et al. 2021)

Wird Nickel aus Altschrott recycelt, können etwa 90 Prozent des Energiebedarfs im Vergleich zum Primärmetall eingespart werden (BGR 2017; Vasters et al. 2021). Abbildung 15 zeigt, dass Sekundärnickel auch mit Hinblick auf weitere Umweltwirkungskategorien Primärnickel deutlich überlegen ist.

Abbildung 15: Gegenüberstellung der Umweltwirkungen von Primär und Sekundärnickel (Class 1) je Tonne [Index 1 = Primärnickel]



Quelle: Daten aus Ecoinvent (Version 3.7); Primärnickel wird durch „"market for nickel, class 1" und Sekundärnickel durch folgenden Datensatz " treatment of metal part of electronics scrap, in copper, anode, by electrolytic refining" dargestellt (Dittrich et al. 2022)

3 Zukünftige Nutzung von Eisen, Kupfer, Aluminium und Nickel

Wie wird die Wirtschaft der Zukunft aussehen, wenn die Klimaziele des Pariser Abkommens tatsächlich umgesetzt und eingehalten werden sollen? Die Beantwortung der Frage wird Auswirkungen auf den Metallverbrauch haben (s. Metalle für die Energiewende (Charday et al. 2022)). Welche Rolle spielt der Ressourcenschutz in Wechselwirkung mit Klimaschutzzielen (s. Rohstoffwende und Energiewende zusammen denken (Charday et al. 2023))? Diesen komplexen Fragestellungen hat sich unter anderem die RESCUE-Studie angenommen. Sie zeigt unterschiedliche Lösungs- und Handlungsspielräume für Wege in ein ressourcenschonendes und treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 auf. Die entwickelten Wege bzw. „Green"-Szenarien beschreiben unterschiedlich ambitionierte Transformationspfade, die in verschiedenen Zeiträumen eine Gesamtminderung der Treibhausgasemissionen Deutschlands um mindestens 95 Prozent gegenüber 1990 erreichen. Alle Szenarien gehen mit einer Reduktion des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffkonsums (RMC) einher, der insbesondere auf dem Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger beruht. (Dittrich et al. 2020a; b; c; Purr et al. 2019)

Überblick über zukünftige Nutzung: RESCUE Studien

Die Pfade der RESCUE-Studie sind unterschiedlich ambitioniert. GreenSupreme stellt den ehrgeizigsten Transformationspfad dar und bringt Deutschland dem 1,5 Grad-Ziel am nächsten, erzielt die höchsten Einsparungen an Primärrohstoffen und geht u.a. von einer wirtschaftlichen Wachstumsbefreiung aus. Dem gegenüber stellt GreenLate einen Pfad dar, auf dem der Wille zur Umsetzung von Klimaschutz, Dekarbonisierung und Ressourcenschutz anfänglich zurückhaltend ist und Maßnahmen erst verzögert umgesetzt werden. (Dittrich et al. 2020b; c; Purr et al. 2019)

Szenario übergreifend spielen die Metalle Eisen und Stahl, Kupfer, Aluminium und Nickel sowie deren Verbindungen eine wichtige Rolle im Hinblick auf den Umbau der Wirtschaft. Eisen und Stahl werden insbesondere für technische Infrastrukturen und energieeffiziente Gebäude gebraucht, Kupfer und Aluminium für Stromleitungen, Spulen und erneuerbare Energiesysteme und Nickel (sowie auch andere Legierungsmetalle) in elektronischen Geräten und Batterien. (ebd.) In Abbildung 16 sind die Entwicklungen des Rohstoffkonsums von Eisen, Kupfer, Aluminium und Nickel gemäß GreenLate und GreenSupreme für die Jahre 2030, 2040 und 2050 abgebildet.[1]

[1] Die getroffenen Annahmen und Maßnahmen in den beiden Szenarien sind ausführlich in (Dittrich et al. 2020a; b; c; Purr et al. 2019) dokumentiert.

Abbildung 16: Letzte inländische Verwendung[1] von Eisen (oben), Kupfer, Aluminium und Nickel (unten) in Deutschland 2010, 2030, 2040 und 2050 gemäß den RESCUE Szenarien in Mio. t Metallgehalt

Quelle: (Dittrich et al. 2020b; c; Purr et al. 2019) Die Werte umfassen den Primärmetallkonsum. Hinweis: 2019er Wert basiert auf DeuRess Modell (ifeu 2023) Umrechnung mit RME Koeffizienten (Schoer et al. 2024)

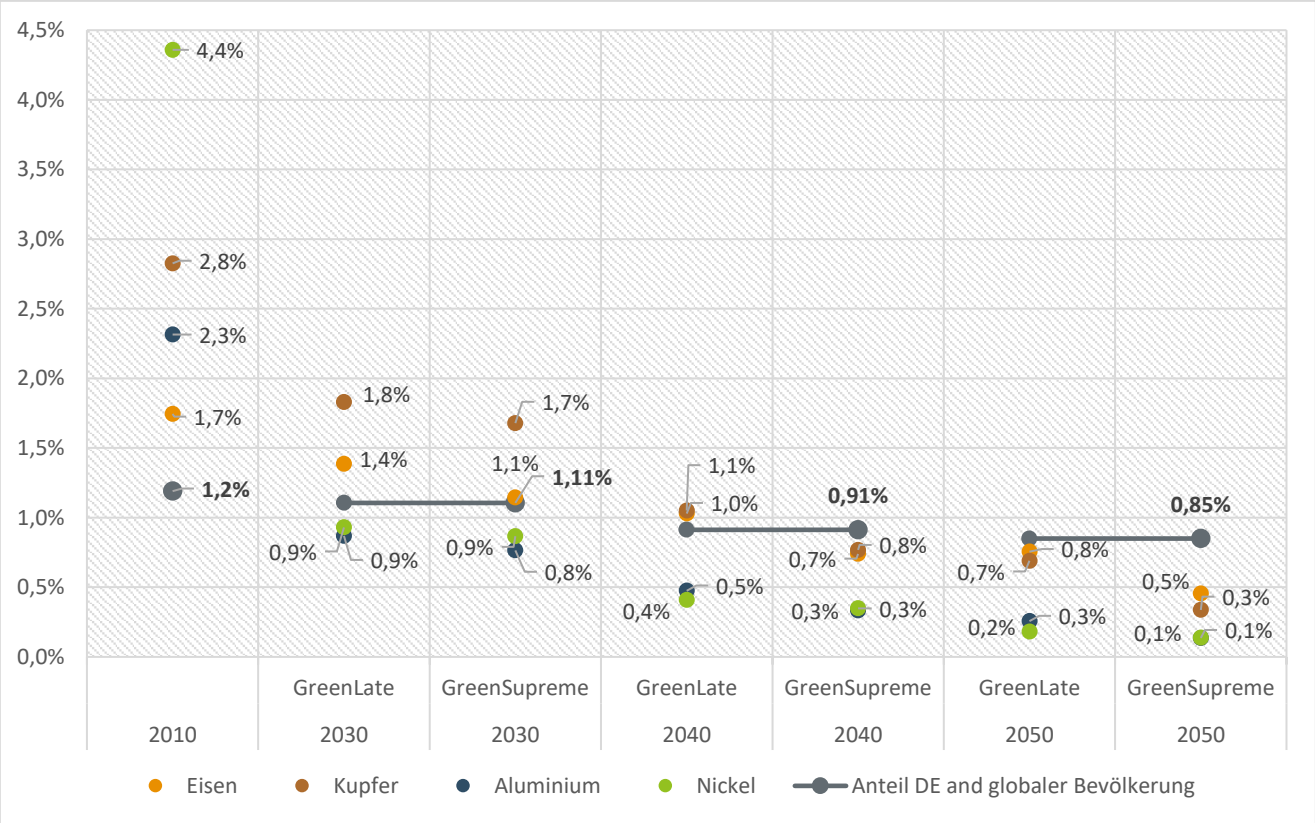
In beiden Szenarien zeigen die Modellierungsergebnisse, dass die Gesamtnachfrage nach den Basismetallen Eisen, Kupfer, Aluminium und Nickel im Zeitverlauf deutlich sinken wird. So liegt im Jahr 2030 in GreenSupreme die inländische Nachfrage nach Eisen noch bei 18 Mio. Tonnen und reduziert sich bis 2050 um 45 Prozent auf ca. 10 Mio. Tonnen (Abbildung 16). Für Kupfer beträgt die Reduktion im Zeitverlauf 2030 bis 2050 ca. 65 Prozent und für Aluminium 55 Prozent, für Nickel knapp 43 Prozent. Die Szenarien unterscheiden sich dabei deutlich. Im weniger ambitionierten Transformationspfad (GreenLate) liegt der Metallbedarf für alle Basismetalle über dem ambitionierten Szenario GreenSupreme.

Es zeigt sich, dass eine verzögerte Umsetzung von Klima- und insbesondere Ressourcenschutzmaßnahmen langfristig deutliche Folgen für den Rohstoffkonsum nach sich zieht. Um die Auswirkungen eines verzögerten Handelns zu verdeutlichen, wird der Rohstoffkonsum der Metalle in Relation zur weltweiten Produktion gesetzt. (IIASA 2020; Riahi et al. 2017;

[1] Dies bezeichnet die inländische Endnachfrage, in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung die „inländische Verwendung“. Diese setzt sich zusammen aus Konsumausgaben und Bruttoinvestitionen. In Rohmaterialäquivalente ausgedrückt ist sie gleichzusetzen mit dem Rohstoffkonsum (RMC).

Statistisches Bundesamt 2015) Als einfacher Richtwert wird der deutsche Anteil an der globalen Bevölkerung in 2030, 2040 und 2050 (1,11 Prozent; 0,91 Prozent und 0,85 Prozent) gesetzt (Riahi et al. 2017; Statistisches Bundesamt 2015). Die globale Produktion wird entsprechend der durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate der letzten zehn Jahre linear fortgeschrieben (USGS 2023). Abbildung 17 zeigt den Anteil der letzten inländischen Verwendung von Eisen, Aluminium, Kupfer und Nickel in Prozent an der (geschätzten) globalen Produktion in 2030, 2040 und 2050.

Abbildung 17: Deutscher Anteil der letzten inländischen Verwendung einzelner Metalle in Prozent an der (geschätzten) globalen Produktion in 2030, 2040 und 2050 und Anteil Bevölkerung Deutschlands an Weltbevölkerung.



Quelle: Eigene Berechnung ifeu auf Basis (Dittrich et al. 2020b; c; Purr et al. 2019; Riahi et al. 2017; Statistisches Bundesamt 2015; USGS 2023) Die globale Produktion (USGS) wurde auf Basis von Durchschnittlichen Wachstumsraten (USGS) fortgeschrieben. Der Anteil Deutschlands an der globalen Weltbevölkerung für 2030, 2040 und 2050 wurde auf Basis von (Destatis 2015; Riahi et al. 2017) (unter Betrachtung SSP1) abgeleitet

Deutschlands (Primär-) Rohstoffkonsum für die Metalle Eisen und Kupfer liegt in 2030 für beide Szenarien noch über dem Anteil Deutschlands an der Weltbevölkerung. Für Aluminium und Nickel liegt der Konsum unter dem Vergleichswert. Die Anstrengungen zur schnellen Umsetzung der Treibhausgasneutralität im GreenSupreme-Szenario führen dazu, dass bereits im Jahr 2040 alle vier betrachteten Metalle unter dem „gerechten“ Anteil von 0,91 Prozent liegt. Im weniger ambitionierten Transformationspfad wird dieser erst in 2050 unterschritten. (Dittrich et al. 2020b; c; Purr et al. 2019; Riahi et al. 2017; Statistisches Bundesamt 2015)

Wie zuvor schon erläutert, gehen mit der Primärmetallförderung zahlreiche Umweltwirkungen einher. Umso wichtiger ist es daher, die Nutzung von Schrotten (Sekundärmetalle) zu

fördern, sofern sie mit weniger Umweltwirkungen verbunden ist, insbesondere vor dem Hintergrund des Mehrbedarfs an Metallen durch die Transformation.

Weitere Studien zur Einordnung zukünftiger Nutzung der vier Basismetalle

Wie sich die Nachfrage nach Metallen in den nächsten Jahrzehnten weiter erhöhen bzw. verändern könnte, ist Gegenstand vieler Studien. Zu diesen zählen auf globaler Ebene etwa die Ergebnisse von Studien im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) und die Szenarien der Internationalen Energieagentur (IEA), auf nationaler Ebene die WWF-Studie „Modell Deutschland Circular Economy“ (MDCE). (IEA 2023a; b; Marscheider-Weidemann et al. 2021; Prakash et al. 2023)

Die WWF-Studie modelliert Szenarien und untersucht darin, in welchem Ausmaß verschiedene Circular Economy-Maßnahmen in Deutschland bis ins Jahr 2045 unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen umgesetzt werden können und welche ökonomischen und ökologischen Auswirkungen sich daraus ergeben. Für einige zentrale Rohstoffe wird ein Vergleich zwischen dem ambitionierten Mix-Szenario und dem Weiter-So (Baseline)-Szenario aufgestellt.

Kupfer

Die Deutsche Rohstoffagentur veranschlagt für wachstumsstarke Zukunftstechnologien auf globaler Ebene einen Kupferbedarf von 5,48 Mio. Tonnen. Das entspricht etwa 27 Prozent der weltweiten Primärproduktion im Jahr 2018 und bedeutet eine Zunahme von 137 Prozent gegenüber 2018 (Nachhaltigkeitspfad SSP1 des IPCC) (siehe Tabelle 1). Würde anstelle einer nachhaltigen Entwicklung (gemäß SSP1) ein fossiler Pfad die globale Entwicklung leiten (SSP5 des IPCC), dann läge der Kupferbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien sogar um den Faktor 2,3 höher als im Jahr 2018 und würde mit 45 Prozent der bisherigen Weltproduktion einnehmen. Dies wäre weitestgehend bedingt durch einen erheblichen Ausbau des Stromnetzes. In SSP5 liegt der Stromverbrauch im Jahr 2040 bei knapp 180 Exajoule, während in SSP1 mit 83 Exajoule weniger als die Hälfte gebraucht wird (zu den einzelnen SSP-Szenarien siehe Infobox). (Riahi et al. 2017).

Für die globale Ebene stellt die IEA (IEA 2023a) in ihrem aktuellen World Energy Outlook fest, wie bedeutsam Kupfer für den Umbau des Energiesystems ist. Was die absoluten Mengen betrifft, dominiert Kupfer die Gesamtnachfrage nach kritischen Mineralien für erneuerbare Energietechnologien, vor allem für die Verwendung im Elektrizitätssektor: Die derzeitige Nachfrage für erneuerbarer Energietechnologien von etwa 5,7 Mio. Tonnen Kupfer pro Jahr steigt im ambitioniertesten Szenario auf 17,4 Mio. Tonnen im Jahr 2050 an. Der globale Gesamtbedarf von Kupfer wird, ausgehend von derzeit rund 25,5 Mio. Tonnen, im ambitioniertesten Szenario mit rund 39,7 Mio. Tonnen einen deutlichen Anstieg erfahren. (IEA 2023b).

Infobox: Die Shared Socio-economic Pathways[1]

Die Shared Socio-economic Pathways (SSPs) beschreiben Rahmenannahmen für die globalen Entwicklungen, die für die Modellierungen der Treibhausgasemissionen festgelegt wurden.

Der SSP 1 beschreibt einen nachhaltigen Entwicklungspfad mit geringen Herausforderungen. Alle Regionen weltweit forcieren eine Transformation hin zu einer Wirtschaftsweise, die Umweltgrenzen respektiert.

Der SSP 2 beschreibt einen Mittelweg für Minderung und Anpassung. Weltweit entfernen sich soziale, wirtschaftliche und technologische Trends nicht stark von historischen Mustern. Entwicklung und Einkommenswachstum verlaufen ungleichmäßig, einige Länder machen gute Fortschritte, andere bleiben hinter den Erwartungen zurück. Globale und nationale Institutionen machen nur langsame Fortschritte bei der Erreichung nachhaltiger Entwicklungsziele.

Der SSP 5 beschreibt einen fossilen Entwicklungspfad. Die Entwicklung von wettbewerbsfähigen Märkten, Innovationen, technologischer Fortschritt und eine partizipative Gesellschaft stehen im Zentrum. Die Ausbeutung der vorhandenen fossilen Rohstoffe wird weiter forciert, der energie- und ressourcenintensive Lebensstil verbreitet sich auf der ganzen Welt.

Kupfer wird aufgrund seiner Bedeutung für die digitale und grüne Transformation und in der europäischen Verteidigung und Raumfahrt als strategisch wichtiger Rohstoff der Zukunft bewertet (JRC 2023a). Von den neun analysierten Sektoren in der WWF-Studie MDCE ist Kupfer in den Sektoren Fahrzeuge und Batterien, IKT- und Haushaltsgeräte sowie Hoch- und Tiefbau besonders relevant. Für Kupfer wird sowohl im Baseline-Szenario als auch im Mix-Szenario ein erheblicher Mehrbedarf in der Versorgungslage Deutschlands gegenüber dem Status Quo errechnet. Im Jahr 2045 wird für das Baseline-Szenario eine Verdopplung des Kupferbedarfs gegenüber dem derzeitigen Bedarf modelliert. (Prakash et al. 2023) Im Mix-Szenario werden, gegenüber der Baseline, weitere 57 Prozent an Mehrbedarf errechnet.

Tabelle 1: Aktuelle und zukünftige Kupferbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global

	Bedarf 2018	SSP1 Nachhaltigkeitspfad	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Feststoffbatteriezellen in E-Mobilitätsanwendungen	-	261.000	76.000	8.000
Wasserelektrolyseure	29	110.400	31.300	5.800
Windkraftanlage	95.100	355.000	317.000	121.000
Meerwasserentsalzung	28.400	21.400	14.300	29.300

[1] Eine ausführliche Beschreibung findet sich in van Vuuren et al. (2017) und Riahi et al. (2017).

Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen	126	1.930	2.490	1.080
Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge	33.200	800.000	816.000	772.600
Legierungen für den Airframe Leichtbau	11.000	12.000	13.000	18.000
Luftfahrtzeuge für 3D Mobilität (eVOTL)	-	150	390	390
Quantencomputer	3	1.150	1.150	1.150
Dünnschicht PV	14	79	8	0
Carbon capture and storage (CCS)	-	22.300	6.100	0
Ausbau Stromnetz	3.825.000	3.832.000	5.759.000	8.211.000
Induktiver Übertrag elektrischer Energie	195	65.640	46.290	17.900
Bedarfssumme	**3.993.067**	**5.483.049**	**7.083.028**	**9.186.220**
Steigerung im Jahr 2040 verglichen mit 2018 [Prozent]		**137**	**177**	**230**

Quelle: (Marscheider-Weidemann et al. 2021)

Eisen und Stahl

Für Eisen und Stahl stellt insbesondere der Ausbau von Windkraftanlagen (WKA) einen Treiber der zukünftigen globalen Nachfrage dar (siehe Tabelle 2). WKA bestehen zu 30 bis 35 Prozent aus Stahl, wodurch nach dem SSP1 Szenario in 2040 etwa 18,7 Mio. Tonnen Stahl und drei Mio. Tonnen Eisen allein für WKA benötigt werden. Im Vergleich zum Materialbedarf im Jahr 2018 bedeutet das eine Verdreifachung des Stahl- und Eisenbedarfs für WKA. Im fossilen Pfad (SSP5) fällt der Bedarf hierfür deutlich geringer aus und liegt auf einem nur leicht erhöhten Niveau im Vergleich mit 2018. Weitere Zukunftstechnologien, für die Eisen bzw. Stahl zunehmend benötigt werden, sind Superlegierungen, Meerwasserentsalzungsanlagen und Anlagen zum rohstofflichen Recycling von Kunststoffen. (Marscheider-Weidemann et al. 2021)

Tabelle 2: Aktuelle und zukünftige Eisen- und Stahlbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global

	2018	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelwerg	SSP5 Fossiler Pfad

Superlegierungen	4.000	8.100	7.600	10.500
Additive Fertigung in Luftfahrt und Medizin-technik	43	1.712	1.426	1.141
Windkraftanlagen (Guss-eisen)	922.000	3.064.000	3.008.000	1.168.000
Windkraftanlagen (Stahl)	5.695.000	18.725.000	18.540.000	7.209.000
Meerwasserentsalzung	24.700	20.000	13.300	27.300
Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen	2.500	38.300	49.480	21.370
Summe	**6.648.243**	**21.857.112**	**21.619.806**	**8.437.311**
Steigerung im Jahr 2040 verglichen mit 2018 [Prozent]		**329**	**325**	**127**

Quelle: (Marscheider-Weidemann et al. 2021)

Aluminium

Ähnlich wie bei Eisen entstehen auch für Aluminium die größten Mehrbedarfe durch den Zubau von WKA (siehe Tabelle 3). Im SSP1 steigt der Aluminiumbedarf im Vergleich zu 2018 allein durch die Verwendung in WKA um den Faktor 2,7. Etwa 160.000 Tonnen Aluminium werden 2040 schätzungsweise für WKA benötigt. Weitere 54.000 Tonnen und damit eine enorme Steigerung im Vergleich zur heutigen Anwendungsstruktur, entstehen durch die steigende Bedeutung der Wasserelektrolyse. Superlegierungen und stationäre Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC)-Systeme benötigen etwa 15.000 Tonnen. Insgesamt steigt der Aluminiumbedarf global durch die in Tabelle 3 gelisteten Zukunftstechnologien um mehr als das Dreieinhalbfache (im SSP1). (Marscheider-Weidemann et al. 2021)

Tabelle 3: Aktuelle und zukünftige Aluminiumbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global

	2018	SSP1 Nachhal-tigkeit	SSP2 Mittel-werg	SSP5 Fossi-ler Pfad
Superlegierungen	5.000	8.900	8.400	11.100
Wasserelektrolyseure	14	54.200	15.400	2.900
Stationäre SOFC-Systeme	49	6.100	3.420	650
Windkraftanlagen	58.300	161.000	18.400	73.300
Meerwasserentsalzung	400	300	200	410

Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen	1	17	22	10
Summe	63.764	230.517	45.842	88.370
Steigerung im Jahr 2040 verglichen mit 2018 [Prozent]		362	72	139

Quelle: (Marscheider-Weidemann et al. 2021)

In einer Studie für International Aluminium wird für Europa mit einer Zunahme des Aluminiumbedarfs um 4,8 Mio. Tonnen bis 2030 gerechnet. Im weltweiten Vergleich wird die stärkste regionale Zunahme für China prognostiziert, wo bis 2030 etwa 12,3 Mio. Tonnen Aluminium zusätzlich gebraucht werden. Insgesamt steigt der globale Bedarf von 86 Mio. in 2020 auf ca. 120 Mio. Tonnen in 2030 an. Größter Wachstumssektor ist der Automobil- und Transportbereich, gefolgt von der Elektroindustrie und dem Bauwesen. In Europa werden allein 2,3 Mio. Tonnen Aluminium im Transportsektor benötigt, vor allem durch den Trend zur Elektrifizierung von Fahrzeugen. E-Autos sind auf leichte Materialien angewiesen, um das hohe Gewicht der Batterien zu kompensieren. Durch die Erhöhung des Aluminiumanteils pro Fahrzeug – auch aufgrund zusätzlicher Aluminiumkomponenten (wie etwa für Batterie-, Motor- und Antriebsgehäuse, Türen, schwellen etc.) – steigt die Nachfrage nach Aluminium im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Ducker Holding LLC 2023; The Aluminium Association 2023). Außerdem werden etwa 0,7 Mio. Tonnen wird für das Bauwesen, 0,6 Mio. t für die Verpackungsindustrie, 0,5 Mio. Tonnen für Elektronik, 0,4 Mio. Tonnen für Maschinen und Anlagen und weitere 0,3 Mio. Tonnen für sonstige Industrien geschätzt. (CRU International Ltd 2022)

Nickel

Bei Nickel übersteigt das prognostizierte Nachfragewachstum durch erneuerbare Energietechnologien auf globaler Ebene zukünftig das der meisten anderen Endanwendungen. Ausgehend von derzeit 457 Kilotonnen in diesem Bereich und 2,9 Mio. Tonnen Gesamtbedarf in allen Endanwendungen, werden im „Net Zero Emissions by 2050 Scenario“ der IEA im Jahr 2050 rund 3,8 Mio. Tonnen Nickel für erneuerbare Energietechnologien benötigt sowie 6,2 Mio. Tonnen insgesamt. Damit liegt der Anteil der erneuerbaren Energietechnologien an der Nachfrage im Jahr 2050 bei über 60 Prozent. (IEA 2023b)

Für Deutschland geht aus der WWF-Studie (Prakash et al. 2023) hervor, dass Nickel insbesondere in den Sektoren Fahrzeuge und Batterien, IKT- und Haushaltsgeräte sowie Hoch- und Tiefbau zukünftig von zunehmender Bedeutung sein wird. Für Nickel wird sowohl im Baseline- als auch im Mix-Szenario ein erheblicher Mehrbedarf in Deutschland gegenüber dem Status Quo errechnet. Im Jahr 2045 wird im Baseline-Szenario ein Anstieg des Nickelbedarfs gegenüber dem derzeitigen Bedarf von 60 Prozent modelliert. Im Mix-Szenario werden gegenüber der Baseline weitere 48 Prozent an Mehrbedarf errechnet. (Prakash et al. 2023)

Die Studie für die DERA berechnet für Nickel bis 2040 einen globalen Bedarf von 1,28 Mio. Tonnen im nachhaltigsten IPCC-Szenario (SSP1). Dies entspricht einer Zunahme um den Faktor 6,8 gegenüber 2018 (siehe Tabelle 4) und ist insbesondere durch die Verwendung von Nickel in Feststoffbatteriezellen in Elektromobilitätsanwendungen zurückzuführen. Hier geht der Trend bei Lithium-Ionen-Batterien in Richtung höherer Nickel- (NMC-811 und NMC-

622) und niedrigerer Kobalt-Gehalte. (Marscheider-Weidemann 2021) Auch durch die Nutzung in der Wasserelektrolyse sowie für Superlegierungen steigt der Bedarf an Nickel stark an, sodass (gemäß SSP1) 2040 etwa 53 Prozent der globalen Primärproduktion in 2018 benötigt werden. (Marscheider-Weidemann et al. 2021; USGS 2020) Für Nickel zeichnet sich eine starke Verschiebung der bisherigen Nutzungsstruktur hin zu Batteriesystemen ab. Gemäß Szurlies (2021) nehmen Batterien 2030 bereits 27 Prozent der globalen Nutzung von Nickel ein und sind damit bereits der zweitgrößte Anwendungsbereich (nach nickelhaltigem Edelstahl mit 56 Prozent). Verglichen mit ca. sieben Prozent in 2020 bedeutet dies einen erheblichen Anstieg innerhalb von zehn Jahren. (SCRREEN 2023; Szurlies 2021)

Tabelle 4: Aktuelle und zukünftige Nickelbedarfe in t für ausgewählte Zukunftstechnologien, global

	2018	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelwerg	SSP5 Fossiler Pfad
Superlegierungen	164.000	301.000	283.000	292.000
Feststoffbatteriezellen in E-Mobilitätsanwendungen	-	702.000	183.000	19.000
Additive Fertigung in Luftfahrt und Medizintechnik	108	2.153	2.333	2.297
Wasserelektrolyseure	53	203.870	57.900	10.800
Stationäre SOFC Systeme	84	10.350	5.800	1.100
Windkraftanlagen	19.100	55.900	60.800	24.000
Meerwasserentsalzung	4.100	3.200	2.100	4.400
Rohstoffliches Recycling von Kunststoffen	114	1.740	2.250	970
Summe	**187.559**	**1.280.213**	**597.183**	**354.567**
Steigerung [Prozent]		**683**	**318**	**189**

Quelle: (Marscheider-Weidemann et al. 2021)

4 Einsparpotenziale nach Bereichen

Etwa neun von zehn Deutschen unterstützen derzeit das Ziel eines Umbaus der deutschen Wirtschaft in Richtung verstärktem Umwelt- und Klimaschutz. Das geht aus der aktuellen Studie „Umweltbewusstsein in Deutschland“ hervor, die das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) alle zwei Jahre gemeinsam mit dem Umweltbundesamt (UBA) herausgibt. Die Bereitschaft zur Veränderung in verschiedenen Lebensbereichen variiert hingegen. So verzichten bereits mehr als die Hälfte (52 Prozent) der Befragten aus Klimaschutzgründen auf Flugreisen, weitere 15 Prozent sind prinzipiell dazu bereit. Insgesamt weniger zu konsumieren ist für zwei Drittel (67 Prozent) eine denkbare Handlungsoption. Allerdings schließen drei Viertel (75 Prozent) der Deutschen für sich aus, auf geringerer Wohnfläche zu leben. (Grothman et al. 2023)

Studien wie etwa die des WWF zum MDCE zeigen eine Bandbreite an Handlungsfeldern auf, um Kreislaufwirtschaftsprinzipien zu implementieren und untersuchen ihren jeweiligen Einfluss auf Rohstoffbedarf und Klimaschutz. Mithilfe eines umfassenden Modellierungsansatzes kann so abgeschätzt werden, welchen Effekt verschiedene Stellhebel haben. (Prakash et al. 2023) Solche Analysen sind vor dem Hintergrund politischer Diskussionen von enormer Bedeutung und dienen als sachliche Entscheidungsgrundlage zur Ausgestaltung entsprechender Instrumente (siehe Kapitel 5).

In diesem Kapitel wird für unterschiedliche Bereiche dargestellt, welchen Einfluss verschiedene Maßnahmen auf den Bedarf der betrachteten Basismetalle haben können. Ausgewählt werden in diesem Rahmen die Effekte

- einer Steigerung der Nutzungsdauer von Gütern am Beispiel von Smartphones;
- die Erhöhung des Sekundärmetalleinsatzes von Eisen, Aluminium und Kupfer;
- der Erhöhung des Recyclings neuer Technologien;
- im Bereich Verkehr durch eine Umverteilung der Pkw-Neuzulassen mit verstärktem Fokus auf das Kleinfahrzeugsegment, einer Reduktion der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland, sowie eine Kombination beider Ansätze;
- Im Bereich Wohnen durch einen stärkeren Zubau von Mehrfamilienhäuser anstelle von Ein- und Zweifamilienhäusern, einer Verminderung der durchschnittlichen Wohnfläche und die Verminderung des Neubaus durch Umsetzung von Suffizienzansätzen;
- einer Substitution von Metallen am Beispiel von Fenstern und
- von Einsparmöglichkeiten im Gesundheitssektor untersucht.

Verlängerung der Nutzbarkeit von Gütern

Im Rahmen von Analysen von für den deutschen Ressourcenbericht wurden unterschiedliche Einflussfaktoren auf den deutschen Rohstoffkonsum untersucht. Darin wird gezeigt, dass die Nachfrage nach Gütern ein zentraler Stellhebel zur Lenkung des Rohstoffbedarfs ist. Die Autor*innen simulieren eine Verdoppelung der Endnachfrage nach Gütern[1] und kommen zum Ergebnis, dass der Rohstoffkonsum um 37 Prozent ansteigt, was mehr als 500 Mio. Tonnen RME entsprechen würde[2]. Die Zunahme des Rohstoffbedarfs erfolgt über alle Materialgruppen. Bei den Metallen steigt der Konsum um über 52 Prozent was etwa 84 Mio. Tonnen RME entspricht. (Lutter et al. 2023; Schoer et al. 2023)

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Maßnahmen, die einer Nachfragesteigerung entgegenwirken, einen umgekehrt stark senkenden Effekt auf den Rohstoffkonsum nehmen können. Eine solche Maßnahme stellt die Verlängerung der Nutzungszeit von Gütern dar. Je länger Güter genutzt werden, desto länger besteht (theoretisch und ohne Berücksichtigung von Rebound-Effekten) keine Nachfrage nach neuen Gütern. Politisch umsetzbar wird eine Lebenszeitverlängerung von Produkten u.a. durch ein Recht auf Reparatur von Gütern. Auch das Verbot einer geplanten Obsoleszenz[3] beim Design von Produkten bildet eine solche Maßnahme.

Im März 2023 hat die Europäische Kommission einem Vorschlag für Vorschriften zur Förderung der Reparatur von Waren angenommen, dieser muss noch vom Europäischen Parlament und Rat angenommen werden. Der Vorschlag umfasst u.a., durch eine gesetzliche Garantie mehr Produkte zu reparieren und Verbraucher*innen bessere Optionen zur Reparatur von Produkten zur Verfügung zu stellen. Dies gilt auch dann, wenn die gesetzliche Garantie bereits abgelaufen ist. Ein weiteres Element ist ein digitaler Produktpass, in dem Hersteller darüber informieren müssen, wie das Produkt hergestellt wurde, ob und wie es repariert werden kann und an welcher Stelle Informationen dazu zu finden sind. (Europäische Kommission 2023a; Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2023)

Eine solche Regelung ist notwendig, denn die Anzahl digitaler und meist kurzlebiger Geräte wie Laptops oder Smartphones ist in den letzten zwei Jahrzehnten stark gestiegen. Vor 20 Jahren besaß in Deutschland etwa nur jede*r Fünfte einen Computer und jede*r Zehnte ein Mobiltelefon. Heute gibt es durchschnittlich pro Kopf einen PC und ein Mobiltelefon. (Lutter et al. 2022) Mit dieser Entwicklung geht ein steigender Rohstoffkonsum einher – besonders für Metalle, denn Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) bestehen zu etwa 41 Prozent aus metallischen Rohstoffen und haben einen Anteil von ca. drei Prozent am gesamten deutschen Rohstoffkonsum und ca. zehn Prozent am deutschen Metallkonsum. Ein Smartphone besteht zu 37 Prozent aus Aluminium, Stahl und Kupfer. Neben diesen Basismetallen werden weitere Metalle wie Gold, Kobalt oder Coltan gebraucht, mit deren Förderung hohe Umweltgefährdungspotenziale einhergehen. (Lutter et al. 2022; Rizos et al. 2019)

Das frühzeitige Entsorgen von Produkten, die durch Reparatur eigentlich noch weiter gebrauchsfähig wären, führt in der EU dazu, dass jährlich etwa 35 Mio. Tonnen Abfall anfallen.

---

[1] Materielle Güter ohne Dienstleistungen und Exporte
[2] Die Modellierung bezieht sich auf die Verdoppelung der Güternachfrage im Jahr 2010.
[3] Darunter verstehen wir einen gezielt herbeigeführten, frühzeitigen Verschleiß oder Alterungsprozess von Produkten.

Durch dieses Wegwerfen werden Schätzungen zufolge 30 Mio. Tonnen Ressourcen verschwendet, ebenso entstehen etwa 260 Mio. Tonnen Treibhausgasemissionen. (Europäische Kommission 2023a)

Wird anstelle der eingangs untersuchten Verdoppelung der angenommen, dass durch eine verdoppelte Nutzungsdauer infolge besserer Maßnahmen rund um Reparatur theoretisch eine Halbierung der Endnachfrage für IKT-Geräte der privaten Haushalte erreicht wird, könnte das in Deutschland in einem Jahr etwa 1,13 Mio. Tonnen RME Metalle einsparen. Davon sind etwa 140 kt Eisen, 280 kt Kupfer, 22 kt Nickel und 105 kt Aluminium (mit Rucksack). Insgesamt würde der RMC um 0,2 % sinken. (Eigene Berechnungen ifeu auf der Basis von Schoer et al. (2023))

Die Veränderung des Konsumverhaltens ist ein wichtiger Hebel für den Rohstoffkonsum, sowohl im positiven als auch negativen Sinne. Allerdings ist die Beeinflussung des Konsumverhaltens schwer zu realisieren und bei politischen Entscheidungsträger*innen sehr unbeliebt (Gefahr der „Verbotsdebatte“) und legt die Verantwortung sehr stark auf die Konsument*innen. Entsprechend braucht es politische Maßnahmen wie etwa das Recht auf Reparatur, um Unternehmen in die Verantwortung einzubeziehen. Der Umfang der Einsparpotenziale durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer wird nachfolgend am Beispiel von den in Deutschland genutzten Smartphones quantifiziert.

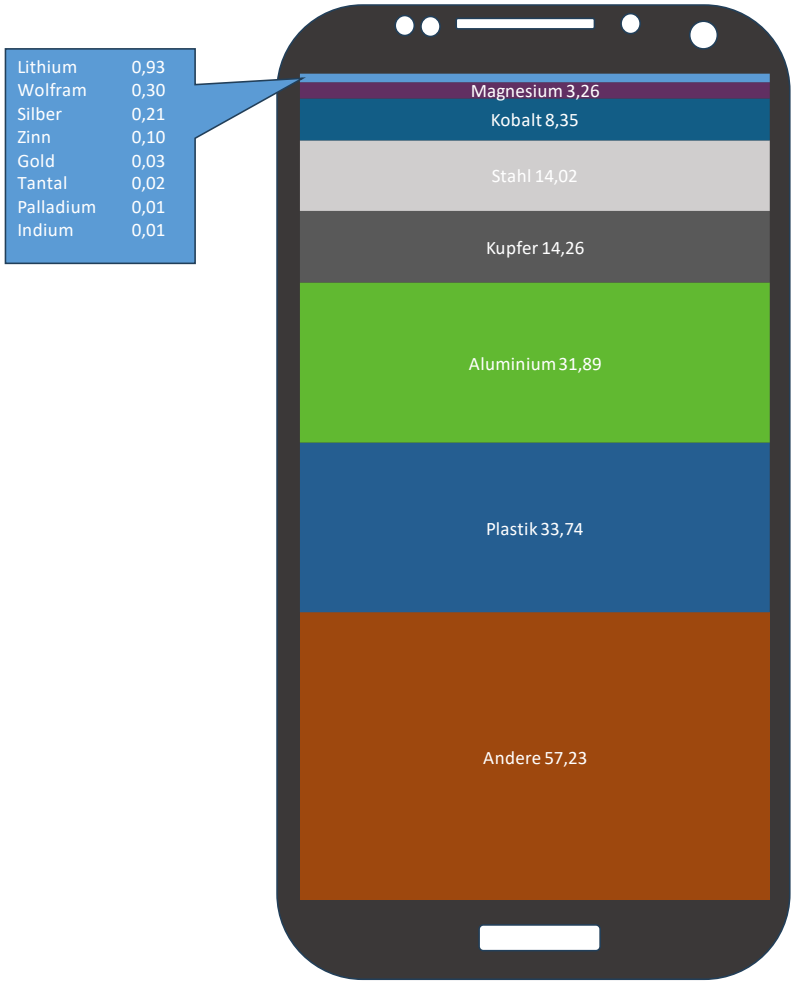
Einsparpotenziale am Beispiel von Smartphones

Obwohl der Rohstoffaufwand für ein einzelnes Smartphone aufgrund des geringen Gewichts überschaubar bleibt, führen hohe Verkaufszahlen und eine niedrige durchschnittliche Nutzungsdauer insgesamt zu erheblichen Rohstoffbedarfen. Zusätzlich werden aufgrund der komplexen Verarbeitung bisher nur geringe Anteile der genutzten Rohstoffe in Smartphones recycelt (Rizos et al. 2019; Supple-Harrsi et al. 2021).

Smartphones enthalten eine Vielzahl an verschiedenen Komponenten und verbauten Materialen. Neben größeren Mengen an Plastik befinden sich darunter auch eine Reihe von Metallen, inklusive solcher, die nach der Klassifizierung der Europäischen Kommission (Europäische Kommission 2023a) als kritisch gelten, bspw. Kobalt, Magnesium, Palladium oder Indium. Abbildung 18 zeigt die geschätzten Bestandteile eines durchschnittlichen Smartphones, inklusive Batterie[1]. Das durchschnittliche Smartphone hat ein Gesamtgewicht von 164 Gramm und besteht zu ca. 21 Prozent aus Kunststoffen, 19 Prozent Aluminium und jeweils ca. neun Prozent Stahl und Kupfer.[2] Der Anteil kritischer Metalle liegt mit Ausnahme von Kobalt (fünf Prozent) und Magnesium (zwei Prozent) bei jeweils unter einem Prozent des Gesamtgewichts. Diese Schätzung beinhaltet allerdings Datenunsicherheiten: Knapp ein Drittel des Gesamtgewichts (ca. 35 Prozent) bilden Komponenten, die aus Mangel an verwertbaren Informationen nicht weiter auf Materialgruppen aufgeteilt werden konnten („Andere“).

[1] Die Daten beruhen auf (Rizos et al. 2019). Die durchschnittliche Menge verschiedener verbauter Materialen wurde darin aus einer Kombination aus Literaturrecherche und Expert*innen-Interviews abgeleitet.
[2] Da es eine große Bandbreite an Smartphone Modellen gibt, kann es im Einzelnen zu starken Abweichungen von diesen Durchschnittswerten kommen.

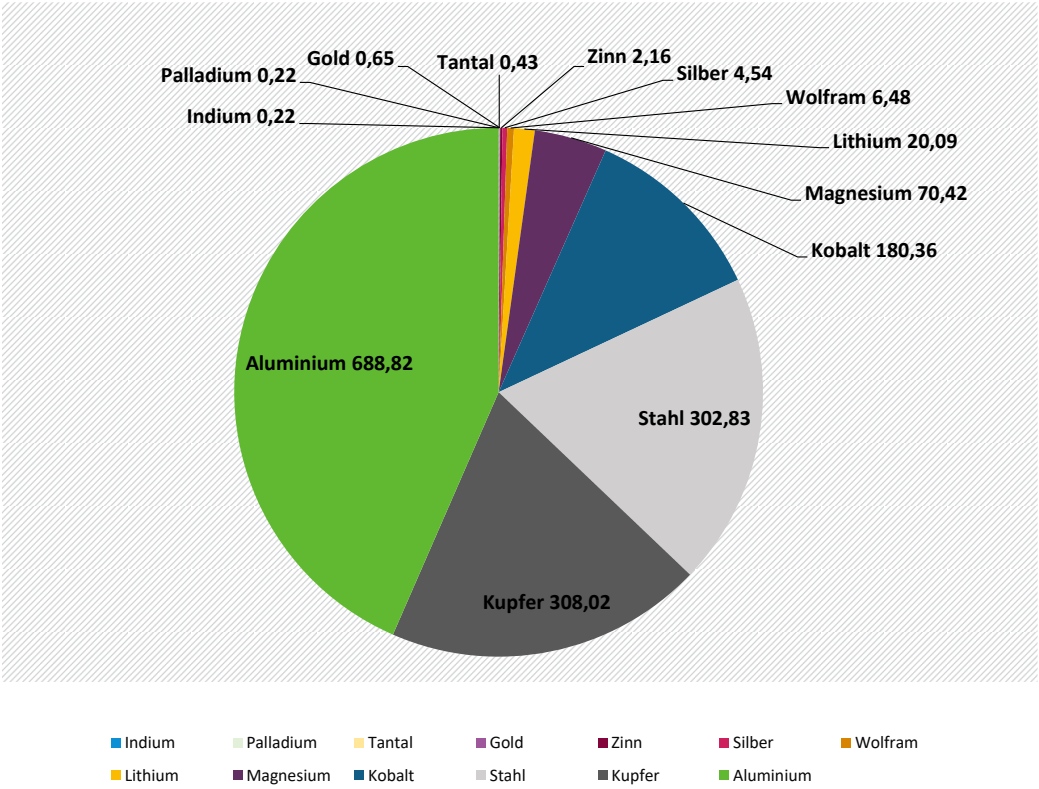
Abbildung 18: Geschätzte Bestandteile eines durchschnittlichen Smartphones inklusive Batterie in Gramm



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Rizos et al. 2019)

Die Zahl der verkauften Smartphones in Deutschland stieg von 5,1 Mio. Einheiten in 2009 auf den Höchststand von 26,2 Mio. Einheiten in 2015. Seitdem gingen die Verkaufszahlen fast jedes Jahr leicht zurück und lagen 2022 bei ca. 21,6 Mio. Stück (statista 2023a). Abbildung 19 zeigt den Metallgehalt der in 2022 in Deutschland verkauften Smartphones, berechnet aus der Anzahl der verkauften Geräte und der von (Rizos et al. 2019) berechneten Rohstoffzusammensetzung eines durchschnittlichen Smartphones. Der Metallanteil der verkauften Smartphones besteht zu ca. 82 Prozent aus den Basismetallen Aluminium, Eisen bzw. Stahl und Kuper. Kritische Metalle machen zusammen ca. 18 Prozent des Metallgehalts der in Deutschland verkauften Smartphones aus.

Abbildung 19: Metallgehalt (in Tonnen) der in 2022 in Deutschland verkauften Smartphones



Quelle: eigene Berechnung auf Basis von (Rizos et al. 2019; statista 2023b)

Während im Jahr 2012 noch 36 Prozent der Bevölkerung Deutschlands ein Smartphone besaßen, waren es 2015 schon 65 Prozent. Seit 2017, liegt die Quote der Smartphone-Nutzenden konstant bei über 80 Prozent, in 2022 waren es 81,1 Prozent (statista 2023a). Während der starke Anstieg der Verkaufszahlen bis 2015 zu einem erheblichen Anteil auf Neuanschaffungen zurückzuführen ist, besteht die seither stabile Nachfrage hauptsächlich aus Ersatzanschaffungen. Aufgrund dessen hätte hier vor allem eine Verlängerung der Nutzungsdauer einen großen Effekt auf den jährlichen Rohstoffbedarf (Rizos et al. 2019).

Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Smartphones in der EU wird mit einer Spanne von unter zwei Jahren (ETC-WMGE 2020) bis ca. drei Jahren (EEB 2019) geschätzt. Hierbei wird ausschließlich die erste Nutzungsphase betrachtet, der Second-Hand Markt ist ausgenommen.[1] Spezifisch für Deutschland wird dabei von einem Wert von durchschnittlich etwa zwei Jahren ausgegangen, welcher mit der üblichen Laufzeit von Mobilfunkverträgen zusammenfällt, zu dessen Neubeginn häufig Neugeräte angeschafft werden (European Commission JRC

[1] Der Markt für gebrauchte und wiederaufbereitete Smartphones beträgt derzeit global noch etwa 10 %, hat allerdings ein hohes prognostiziertes Wachstumspotenzial: von einem prognostizierten Volumen von ca. 50,5 Milliarden USD bis auf über 120 Milliarden USD in 2030 (statista 2024a). Gleichzeitig liegt der prognostizierte Smartphone-Markt insgesamt für 2024 bei ca. 500 Milliarden USD (statista 2024b). Laut einer Deloitte Umfrage gaben 2022 in Deutschland immernoch 85 % der Befragten an, ihr aktuelles Smartphone neugekauft zu haben (Deloitte 2022).

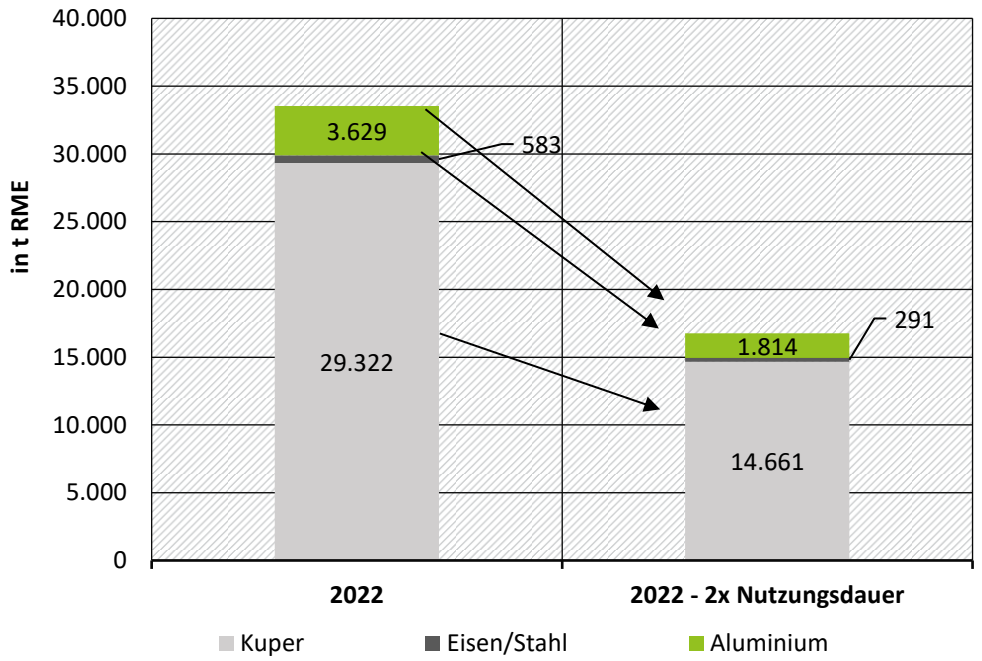
2020). Auch der Software-Support für Android-Smartphones beträgt derzeit im Durchschnitt zwei Jahre (Supple-Harrsi et al. 2021).[1]

Eine gezielte Unterstützung der Verlängerung der Nutzungsdauer könnte den bestehenden Trend verstärken. Denn die durchschnittliche Nutzungszeit von Smartphones ist seit 2013 sowohl in den der EU als auch den USA und China deutlich gestiegen. So lag die durchschnittliche Smartphone Nutzung in Deutschland in 2013 bei nur 17,1 Monaten. Als Grund für diesen Trend wird unter anderem eine geringere Innovationsgeschwindigkeit angenommen (ETC-WMGE 2020; Kantar Worldpanel 2017).

Abbildung 20 zeigt den Rohstoffbedarf in Tonnen RME der drei Basismetalle Aluminium, Stahl/Eisen und Kuper bei den 2022 in Deutschland verkauften Smartphones.[2] Hierbei wird zwischen zwei Fällen unterschieden: zum einen der angefallene Rohstoffbedarf, basierend auf den realen Verkaufszahlen; zum anderen wurde ein alternative Variante berechnet, in dem die durchschnittliche Nutzungsdauer von Smartphones in Deutschland auf vier Jahre verdoppelt wurde und daher vereinfachend von einer Halbierung des Rohstoffbedarfs ausgegangen wird. Im Vergleich zu Abbildung 19 zeigt sich der Einfluss der Umrechnung in Rohmaterialäquivalente (mittels RME-Koeffizienten): Während Aluminium in absoluten Mengen den Rohstoffbedarf dominiert und Kupfer und Stahl auf einem ähnlichen Niveau liegen, so übersteigt Kupfer in Tonnen RME die Werte für Aluminium und Stahl um ein Vielfaches.

[1] Apple-Smartphones schneiden hier deutlich besser ab: Sicherheitsupdates werden teilweise bis zu 7 Jahre nach Produktionsende des Modells bereitgestellt (Supple-Harrsi et al. 2021).
[2] Hierfür wurden die aktuellen RME-Koeffizienten des EU RME Models von Eurostat genutzt (Schoer et al. 2024).

Abbildung 20: Rohstoffbedarf für ausgewählte Rohstoffe in Tonnen RME für Smartphones verkauft in Deutschland 2022



Quelle: eigene Berechnung auf Basis von (Rizos et al. 2019; Schoer et al. 2024; statista 2023b)

Die hier durchgeführte Beispielrechnung einer Verdopplung der durchschnittlichen Nutzungsdauer von Smartphones ist prinzipiell auch auf andere IKT-Geräte übertragbar. Die Einsparpotenziale sind dabei allerdings von Faktoren abhängig, die sich stark zwischen Gerätetypen unterscheiden, wie etwa die materielle Zusammensetzung, Verkaufsvolumen und Recyclingpotenzial der Komponenten etc. Zudem tritt eine Reduktion des Rohstoffbedarfs mit steigender durchschnittlicher Nutzungsdauer vor allem dann unmittelbar ein, wenn der Anteil der Ersatzkäufe im Vergleich zu Neukäufen hoch ist.

Rezyklateinsatzquote erhöhen

Eine produktspezifische Mindestquote für den Einsatz von Rezyklaten und Sekundärrohstoffen ist eine Maßnahme zur Förderung der Kreislaufwirtschaft. In der Analyse von Schoer et al. (2023) wird mittels des umweltökonomische Rohstoffmodells URMOD simuliert[1], welchen Effekt der bisherige Einsatz von Sekundärmetall auf den deutschen Rohstoffkonsum hat. Ebenso untersucht die Studie, zu welcher Verminderung des Rohstoffkonsums eine Erhöhung des Sekundärmetalleinsatzes führt. Die Studie kommt für die Metalle Eisen, Kupfer und Aluminium zu folgenden Ergebnissen:

Kupfer

[1] Eine Beschreibung der Simulationsannahmen sowie des genutzten Models URMOD ist ausführlich in (Lutter et al. 2023) dokumentiert.

- Die Recyclingaktivitäten in Deutschland und der Einsatz von Sekundärkupfer (von ca. 56 Prozent) im Jahr 2010 sparen etwa 12,4 Mio. Tonnen RME Primärkupfer in Deutschland ein. (Schoer et al. 2023)
- In einer noch unveröffentlichten Studie von Dittrich et al. (2024) wurden maximal mögliche Sekundäreinsatzquoten durch tatsächlich verfügbare EoL-Schrottmengen für (u.a.) Kupfer, Eisen und Aluminium ermittelt. Für Kupfer wird für Deutschland bis 2030 eine Sekundäreinsatzquote von 49 Prozent ermittelt, bis 2050 steigt diese auf Basis der in Deutschland rückgeführten EoL-Kupferschrotte auf etwa 59 Prozent an. (Dittrich et al. 2024)
- Würde der Anteil von Kupferschrotten im Inland auf 59 Prozent gesteigert, ließe sich der gesamte Rohstoffkonsum in Deutschland um 0,1 Prozent (0,8 Mio. Tonnen RME) senken. (Eigene Berechnungen ifeu auf der Basis von Schoer et al. (2023))

Eisen

- Die bisherigen Recyclingaktivitäten und der Einsatz von Sekundäreisen (von ca. 33 Prozent im Jahr 2010) sparen etwa 8,7 Mio. Tonnen RME gegenüber einer rein auf Primäreisen basierenden Situation in Deutschland ein[1]. (Schoer et al. 2023)
- Für Eisen wird für Deutschland bis 2030 von einer realisierbaren Sekundäreinsatzquote von 63 Prozent ausgegangen, bis 2050 steigt diese auf Basis der in Deutschland rückgeführten EoL-Eisenschrotte auf etwa 75 Prozent an. (Dittrich et al. 2024)
- Bei einer Erhöhung des Sekundäranteile auf 75 Prozent könnten deutliche Einspareffekte erzielt werden; der Rohstoffkonsum (mit Rucksack) vermindert sich um ca. 1,1 Prozent, in der Materialgruppe Metallerze sogar um 6,5 Prozent. Etwa 15 Mio. Tonnen RME könnten im Vergleich mit den bisherigen Recyclingaktivitäten eingespart werden, 10,6 Mio. t davon Metalle. (Eigene Berechnungen ifeu auf der Basis von Schoer et al. (2023))

Aluminium

- Die bisherigen Recyclingaktivitäten und der Einsatz von Sekundäraluminium (von ca. 54 Prozent im Jahr 2010) sparen etwa 1,6 Mio. Tonnen RME gegenüber einer rein auf Primäraluminium basierenden Situation in Deutschland ein. (Schoer et al. 2023)
- Für Aluminium wird für Deutschland bis 2030 von einer realisierbaren Sekundäreinsatzquote von 67 Prozent ausgegangen, bis 2050 bleibt die Quote auf Basis der in Deutschland rückgeführten EoL-Aluminiumschrotte auf dem gleichen Niveau. (Dittrich et al. 2024)
- Bei einer Aluminiumschrotteinsatzquote von 67 Prozent können leichte Einspareffekte erzielt werden; der RMC vermindert sich um minus 0,1 Prozent, in der Materialgruppe Metallerze um minus 0,2 Prozent, das sind etwa 0,35 Mio. Tonnen RME weniger als im Status Quo, welcher von 54 Sekundäraluminium ausgeht. (Eigene Berechnungen ifeu auf der Basis von Schoer et al. (2023))

Auch in weiteren Studien ist die Erhöhung von Sekundärrohstoffen, insbesondere von Sekundärmetallen ein wichtiger Stellhebel zur Verminderung von Treibhausgasemissionen

[1] Bei Eisen wird nur der Effekt der Substitution von Primäreisen durch Sekundäreisen betrachtet. Nicht berücksichtigt als Recycling wurde die Tatsache, dass bei der Herstellung von Primäreisen aus technischen Gründen nicht ausschließlich Metallerz, sondern in erheblichem Umfang auch Schrott eingesetzt wird. (Lutter et al. 2023)

und des gesamtdeutschen Rohstoffbedarfs. Prakash et al. (2023) beispielsweise quantifizieren den Effekt einer verstärkten Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen für verschiedene Sektoren: Im Bereich Haushaltsgeräte und IKT werden durch eine Erhöhung der Rückgewinnung etwa 725 Kilotonnen Rohstoffe (mit Rucksack) gegenüber dem „Weiter so"-Szenario[1] eingespart und 0,1 Mio. Tonnen CO_2 vermieden. (Prakash et al. 2023)

Recycling von Anlagen für Erneuerbare Energien

Die Verminderungen des Primärmetalleinsatzes und der daraus folgenden Abschwächung von Umweltwirkungen (CO_2-Emissionen, Süßwassernutzung und Landnutzung, siehe vorheriges Kapitel) sind zwangsläufig gekoppelt an die Frage der Verfügbarkeit von Sekundärmetallen. Das Potenzial durch eine erhöhte Sekundärrohstoffquote kann daher nur genutzt werden, wenn der Recyclingsektor ausgebaut wird und zunehmend Anlagen, die im Bereich der Transformation der treibhausgasintensiven Sektoren ausgeweitet wird. Das bedeutet konkret, dass am Ende des Lebenszyklus von Anlagen für erneuerbare Energien, wie Windturbinen, Photovoltaikanlagen und Batterien, die Rückgewinnung der darin enthaltenen Metalle von großer Bedeutung ist, um den Primärrohstoffbedarf für Ersatz bzw. weiterentwickelte Anlagen zu mindern.

Die IEA geht davon aus, dass die „Abfälle" von erneuerbaren Energietechnologien bereits in den nächsten zehn Jahren voraussichtlich um das 30-fache ansteigen werden. (European Environment Agency 2021) Herausfordernd ist, dass es derzeit in der EU nur wenige Erfahrungen etwa mit dem Recycling von Windturbinen gibt, da nur wenige der ersten installierten Windturbinen bis 2020 bereits das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben.

Nachfolgend ist aufgezeigt, welche Mengen EoL (End-of-Life) aus drei ausgewählten Zukunftstechnologien im Jahr 2030 zu erwarten sind.

Tabelle 5: EoL-Abfälle ausgewählter Technologien in der EU in 2030

	PV	Windturbinen	Energiespeicher und Mobilität
Insgesamt (kt)	1.500	4.750	240
Recyclingpotenzial	95 Prozent	90 Prozent	100 Prozent
Aluminium (kt)	162	10,6	
Kupfer (kt)	99	22,3	31,8
Nickel (kt)		3,5	15,4

[1] „Weiter-so" ist die Baseline 2045. Das Szenario bildet ab, was bis 2045 erreichen können, wenn sich Konsumverhalten und technologischer Fortschritt weiter entlang existierender Trends entwickeln.

Quelle: (European Environment Agency 2021; Graulich et al. 2021)

Mittels des deutschen Anteils am Europäischen Materialkonsum (ohne Rucksack), welcher 2021 bei 18,5 Prozent liegt, werden vereinfacht die entsprechenden Schrottmengen für Deutschland abgeschätzt (Riahi et al. 2017; Statistisches Bundesamt 2015)[1]. In 2030 stünden somit etwa 32 Kilotonnen Aluminium, 28,3 Kilotonnen Kupfer und 3,5 Kilotonnen Nickel aus den drei EoL-Anwendungen zur Rückführung in einen erneuten Produktionsprozess zur Verfügung. In Relation zu den abgeschätzten deutschen Bedarfen in 2030 (siehe Abbildung 16 für GreenSupreme) entspräche dies jeweils einer EoL-RIR von 1,7 Prozent Sekundäranteil für Aluminium, 3,2 Prozent Sekundäranteil für Kupfer und 10,5 Prozent Sekundäranteil für Nickel. (Dittrich et al. 2020b; European Environment Agency 2021; Eurostat 2023; Graulich et al. 2021; Purr et al. 2019; Riahi et al. 2017) Zwar erscheinen die Anteile gering, jedoch umfassen sie nur die Schrottmengen, die aus den drei Zukunftstechnologien stammen und klammern konventionelle Anwendungsbereiche und deren EoL-Schrottmengen aus.

Ansatzpunkte im Bereich Verkehr

Etwa 24 Mio. t RME Metalle wurden 2019 für den Mobilitätsbereich des Konsums der privaten Haushalte genutzt. Wie eingangs erläutert, ist der private Konsum der Haushalte aber nur ein Bereich der gesamten Endnachfrage, weitere Metallbedarfe fallen weiterhin durch den Konsum des Staates, privater Organisationen und durch Bruttoanlageinvestitionen an. Werden auch diese miteinbezogen, umfasst der metallische Rohstoffkonsum der Bereiche Kraftfahrzeuge, Schiffe, Züge und Luftfahrt ca. 28 Mio. Tonnen RME. Vor Abzug der Exporte, d.h. bei Betrachtung des Rohstoffeinsatzes, liegt der metallische Rohstoffeinsatz bei ca. 81 Mio. Tonnen RME. Sowohl beim Rohstoffeinsatz (RMI) als auch beim Rohstoffkonsum (RMC) haben die Kraftfahrzeuge innerhalb der hier betrachteten Güterkategorien mit ca. 90 Prozent den größten Anteil.[2] Mehr als die Hälfte des metallischen Rohstoffkonsums der Kraftfahrzeuge fällt auf Eisen (53 Prozent), gefolgt von Kupfer (18 Prozent), Aluminium (sieben Prozent) und Nickel (drei Prozent). Allein die vier Basismetalle machen – bei Berücksichtigung des Rohstoffrucksacks – somit über 80 Prozent der genutzten Metalle in Fahrzeugen aus.

In Deutschland werden jedes Jahr rund 3 Mio. Pkw neu zugelassen und bestimmen den Rohstoffkonsum der Kraftfahrzeuge. 2019 lag die Zahl der Neuzulassungen sogar bei 3,5 Mio. Pkw; in den drei Folgejahren bis 2022 lagen die Neuzulassungen mit ca. 2,5 Mio. Stück deutlich unter den Vorjahreszahlen. Mit etwa 470.000 Fahrzeugen liegen E-Pkw mittlerweile auf dem Niveau der Diesel Pkw-Zulassungen (ca. 18 Prozent der Zulassungen). (UBA 2023). Neben der Entwicklung der Neuzulassungen insgesamt ist insbesondere die Entwicklung der Leergewichte der Neuzulassungen für den Materialbedarf relevant.

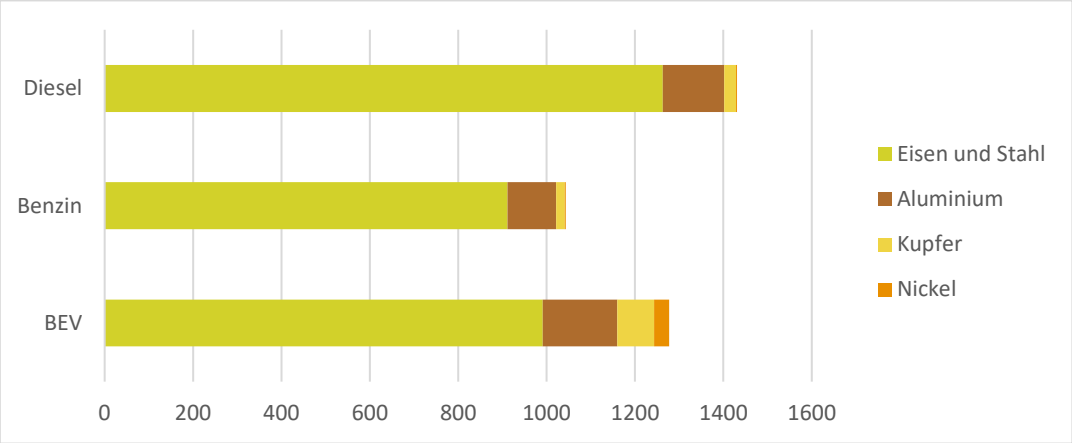
Seit 2003 haben die Leergewichte neu zugelassener Fahrzeuge um 23 Prozent zugenommen. Laut Kraftfahrtbundesamt liegt das Durchschnittsgewicht 2022 bei ca. 1,7 Tonnen, das sind

[1] Deutschland war in Europa ab 2000 Vorreiter in Europa im Aufbau von PV und Windenergieanlagen (Quaschning 2024). Die in Deutschland verfügbaren EoL-Recyclingmengen werden über die Hilfsgröße des deutschen Anteils am Europäischen DMC daher eher unterschätzt und stellen eine grobe Annäherung dar.
[2] Anteil Schiffe am RMC und RMI: 6 Prozent bzw. 3 Prozent, Züge: 4 Prozent bzw. 6 Prozent und Flugverkehr: 4 Prozent bzw. 2 Prozent. Betrachtet werden die RME Kategorien: RME128 - Motor vehicles; RME129 - Ships, boats; RME130 – Railway und RME131 - Air, spacecraft. Daten stammen von ifeu (DeuRess Modell)

ca. 230 Kilogramm mehr als in 2010. Gründe für die Zunahme sind steigende Fahrzeugabmessungen[1] sowie Sicherheits- und Komfortausstattung. Auch der steigende Anteil der Elektrofahrzeuge spielt (verstärkt seit 2019) eine Rolle. Diese sind bei Mittelklasse-Pkw aufgrund der Batterie etwa 280 bis 360 Kilogramm schwerer als Benzin- oder Diesel-Pkw (trotz Wegfall des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs: Motor, Getriebe, Abgasnachbehandlung). Zusätzlich ist bei den Neuzulassungen insgesamt eine Verschiebung der Anteile von kleineren Segmenten zugunsten größerer Segmente (SUVs) erfolgt. So ist der Bestand kleinerer Pkw in den letzten zehn Jahren nur um zwei Prozent angewachsen, der von großen Fahrzeugtypen, wie Vans und SUVs, dagegen um 80 Prozent. (Tauer und Aechtner 2023) (KBA o.J.) Werden mit Hinblick auf die Fahrzeuggewichte ausschließlich die Basismetalle Eisen (und Stahl), Aluminium, Kupfer und Nickel betrachtet, zeigt sich, dass die Leergewichte der verschiedenen Antriebstypen gar nicht so stark variieren, wie wenn entsprechende Batterierohstoffe berücksichtigt würden. Das liegt daran, dass die Metalle zum Großteil in antriebsunabhängigen Fahrzeugteilen wie z.B. der Karosserie und dem Fahrgestell eingesetzt werden.

Abbildung 21 zeigt die Materialzusammensetzung eines mittleren Pkw der drei Antriebstypen Batterie-Elektrofahrzeug (BEV), Diesel und Benzin zum Stand 2020 differenziert nach den vier Basismetallen. Der Diesel-Pkw ist demnach (mit Blick auf die vier betrachteten Metalle) mit 1,4 t noch ca. 150 Kilogramm schwerer als das Elektro-Fahrzeug und ca. 390 Kilogramm schwerer als der Benziner. Für die Leergewichte des Segments Kleinfahrzeuge wird auf Basis von ifeu vorliegenden aktuellen Daten des KBA eine um den Faktor 0,81 geringere Materialintensität angesetzt, beim Großfahrzeugsegment ein Faktor 1,26.

Abbildung 21: Materialzusammensetzung für unterschiedlicher Antriebsstränge eines mittleren PkW für Basismetalle



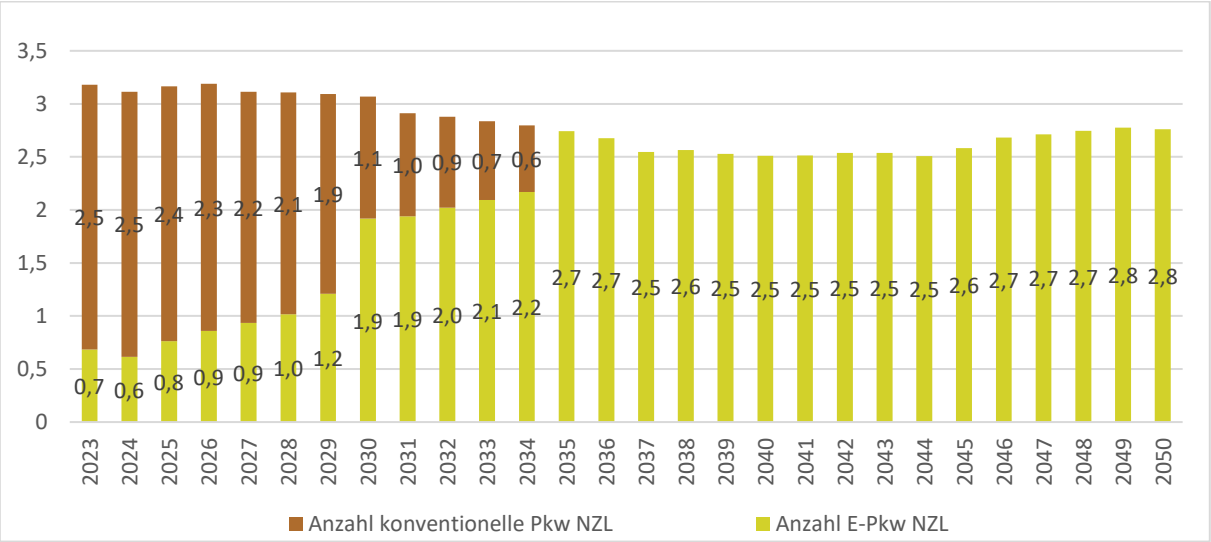
Quelle: eigene Berechnungen ifeu auf Basis von (KBA o.J.)

In Folge wird untersucht, welche Einspareffekte eine Umverteilung der Fahrzeug-Größensegmente und die Reduzierung der Neuzulassungsanzahl insgesamt auf den Materialbedarf der neuzugelassenen Pkw hat. Zunächst wird der Materialbedarf des Status Quo bestimmt. Hierzu werden die prognostizierte Entwicklung der Neuzulassungen in Deutschland bis 2050 aus dem Projektionsbericht 2023 herangezogen (Harthan et al. 2023; Öko-Institut e.V. et al.

[1] Beispielsweise ist der Opel Corsa F (ab 2019) 24 cm länger und 12 cm breiter als der Corsa C (bis 2003).

2023). Der Projektionsbericht 2023 zeigt im MMS-Szenario[1] die Entwicklung der PkW Neuzulassungen differenziert nach konventionellen Antrieben und elektrischen Fahrzeugen bis zum Jahr 2050 (siehe Abbildung 22). Pkw mit konventionellen Antrieben nehmen bis 2035 schrittweise ab, sodass ab 2035 nur noch elektrische PkW neuzugelassen werden. In 2050 liegt die Anzahl der Neuzulassungen bei etwa 2,8 Mio. Stück.

Abbildung 22: Anzahl der Neuzulassungen (NZL) in Mio. Stück differenziert nach konventionellen Pkw und E-Pkw im MMS Szenario des Projektionsberichts 2023



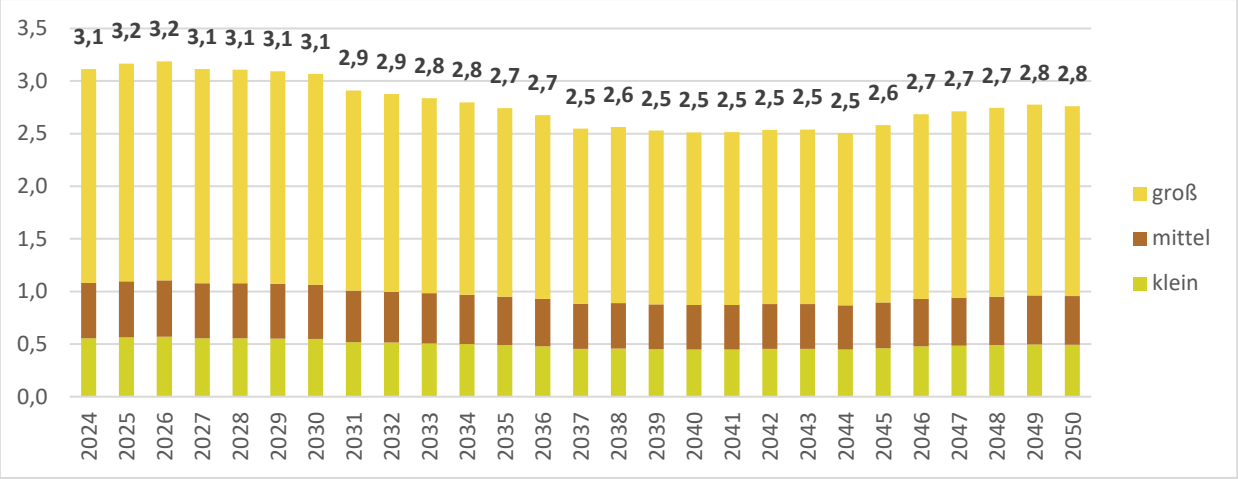
Quelle: (Öko-Institut e.V. et al. 2023); Hinweis Abkürzungen: Neuzulassungen (NZL)

In 2022 werden nach KBA (Kraftfahrt-Bundesamt) etwa 18 Prozent der Neuzulassungen dem Kleinfahrzeugsegment zugeordnet[2], 17 Prozent dem mittleren Größensegment (Kompaktklasse) und 65 Prozent dem Großfahrzeugsegment (u.a. Mittelklassewagen und SUVs, Sportwagen) (KBA o.J.). Diese Verteilung wird auf die prognostizierten NZL der konventionellen und elektrischen Pkw übertragen. Damit ergibt sich die in Abbildung 23 dargestellte Entwicklung der NZL nach Größensegmenten.

[1] Der Projektionsbericht umfasst u.a. das MMS-Szenario: Das Mit-Maßnahmen-Szenario (MMS) berücksichtigt die zum jeweiligen Modellierungsbeginn gültigen Maßnahmen. Die Emissionsminderungen dieses Szenarios können als weitestgehend gesichert gelten, soweit die angenommenen Preisentwicklungen und weitere Rahmendaten eintreten. Weiterhin gibt es das MWMS-Szenario. In dieses Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario gehen zusätzlich zu den Maßnahmen des MMS bereits konkret geplante, jedoch noch nicht implementierte Maßnahmen ein. Für die Abschätzungen der Kurzstudie wird das MMS berücksichtigt.

[2] Im Rahmen dieser Studie wurde in Anlehnung an (Knörr et al. 2016) das KBA Segment Kompaktklasse und Mini-Vans als mittlere Pkw-Größe festgelegt; zum kleinen Fahrzeugsegment zählen Minis und Kleinwagen; zum großen Fahrzeugsegment zählen die KBA Segmente Mittelklasse, obere Mittelklasse, Geländewagen (inkl. SUVs), Großraum-Vans, Oberklasse, Wohnmobile, Sportwagen, Utilities und Sonstige.

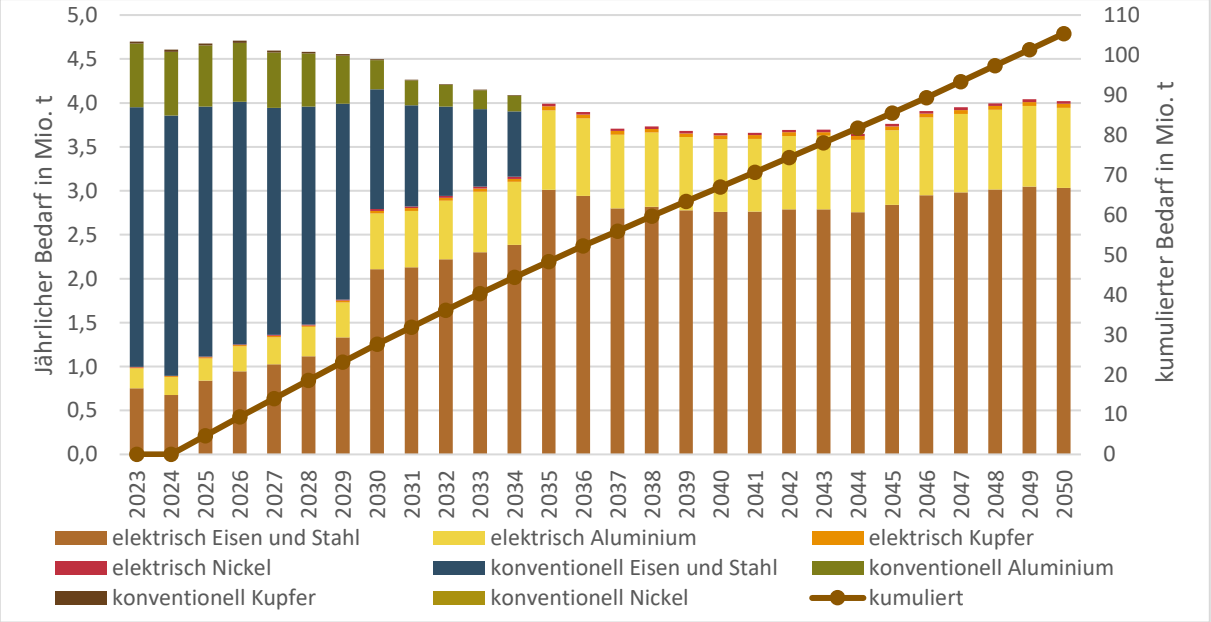
Abbildung 23: Anzahl der Neuzulassungen (NZL) in Mio. Stück differenziert nach Größensegmenten



Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung ifeu auf Basis von (KBA o.J.; Öko-Institut e.V. et al. 2023)

Auf Grundlage der Entwicklung der Neuzulassungen nach Größensegmenten (Abbildung 23) und den Materialintensitäten pro Fahrzeug (Abbildung 21) lassen sich Metallbedarfe der Neuzulassungen bis 2050 ableiten. Diese sind in Abbildung 24 und nach Antriebsstrang differenziert dargestellt. Da die NZL der konventionellen Pkw auslaufen, sind die Metallbedarfe ab 2035 vollständig den E-Pkw zuzuordnen. Kumuliert für den Zeitraum 2025-2050 ergibt sich ein Metallbedarf von ca. 104 Mio. t Metalle für die geplanten Neuzulassungen, wenn die Verteilung der Größensegmente fortgeführt wird und die Materialbedarfe pro Fahrzeug konstant bleiben.

Abbildung 24: Jährliche Metallbedarfe der Neuzulassungen differenziert nach Metallen und Antriebsstrang bis 2050 in Mio. t sowie kumulierter Bedarf bis 2050 – Status Quo



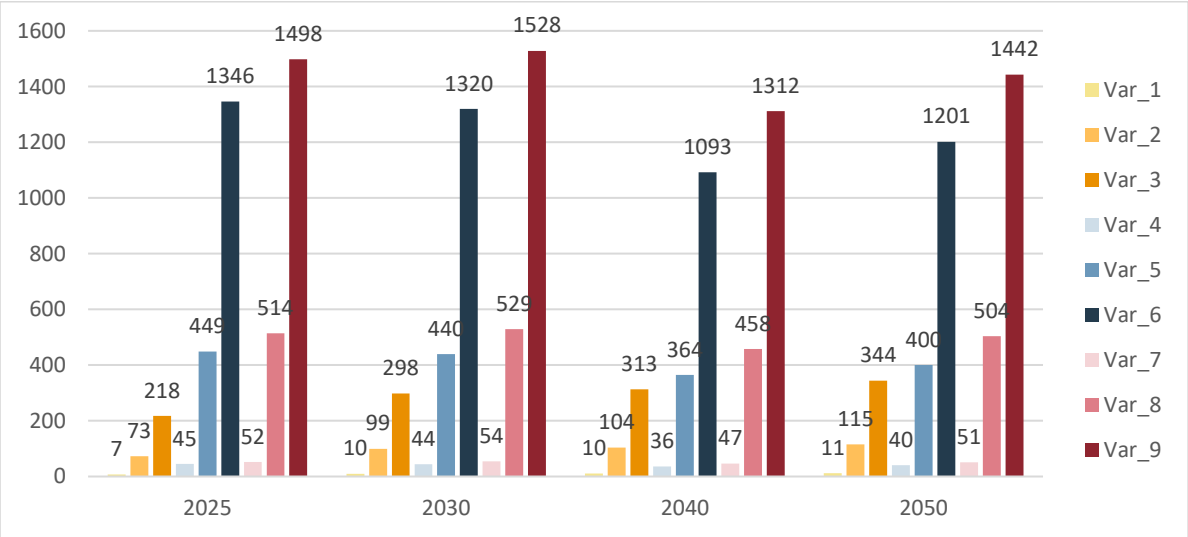
Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung ifeu auf Basis von (KBA o.J.; Öko-Institut e.V. et al. 2023)

In Folge werden unterschiedliche Varianten und deren Einfluss auf Materialeinsparungen gegenüber dem Status Quo berechnet:

- **Umverteilung der Größenklassensegmente**: von den Mittel- und Großfahrzeugsegment-NZL werden jährlich je 1 Prozent (Var 1) / 10 Prozent (Var 2) / 30 Prozent (Var 3) in das Segment Kleinfahrzeuge verschoben. D.h. es werden mehr Kleinfahrzeuge zugelassen, weniger mittelgroße/mittlere und große Fahrzeuge. Die gesamte Anzahl der NZL entspricht dem Status Quo des Projektionsberichts.
- **Verminderung der Neuzulassungen**: die im Projektionsbericht prognostizierten Neuzulassungen werden jährlich um 1 Prozent (Var 4) / 10 Prozent (Var 5) / 30 Prozent (Var 6) vermindert. Insgesamt werden von 2025 bis 2050 ca. 130.000 bzw. 1,3 Mio. weniger Neufahrzeuge zugelassen als im Status Quo.
- **Kombination Umverteilung und Verminderung der NZL**: 1 Prozent Umverteilung der NZL (der mittleren und großen Fahrzeuge) ins Kleinwagensegment + 1 Prozent jährliche Verminderung der NZL (Var 7); 10 Prozent Umverteilung der NZL (der mittleren und großen Fahrzeuge) ins Kleinwagensegment + 10 Prozent Verminderung der jährlichen NZL (Var 8); 30 Prozent Umverteilung der NZL (der mittleren und großen Fahrzeuge) ins Kleinwagensegment + 30 Prozent Verminderung der jährlichen NZL (Var 9).

Abbildung 25 zeigt die Materialeinsparungen der sieben Variationen (Var 1 bis Var 9) gegenüber dem Metallbedarf im Status Quo für ausgewählte Jahre. Abbildung 26 zeigt die kumulierten Einsparungen für den Zeitraum 2025 bis 2050.

Abbildung 25: Materialeinsparungen der Varianten 1 bis 9 gegenüber dem Bedarf im Status Quo für ausgewählte Jahre in 1000 t



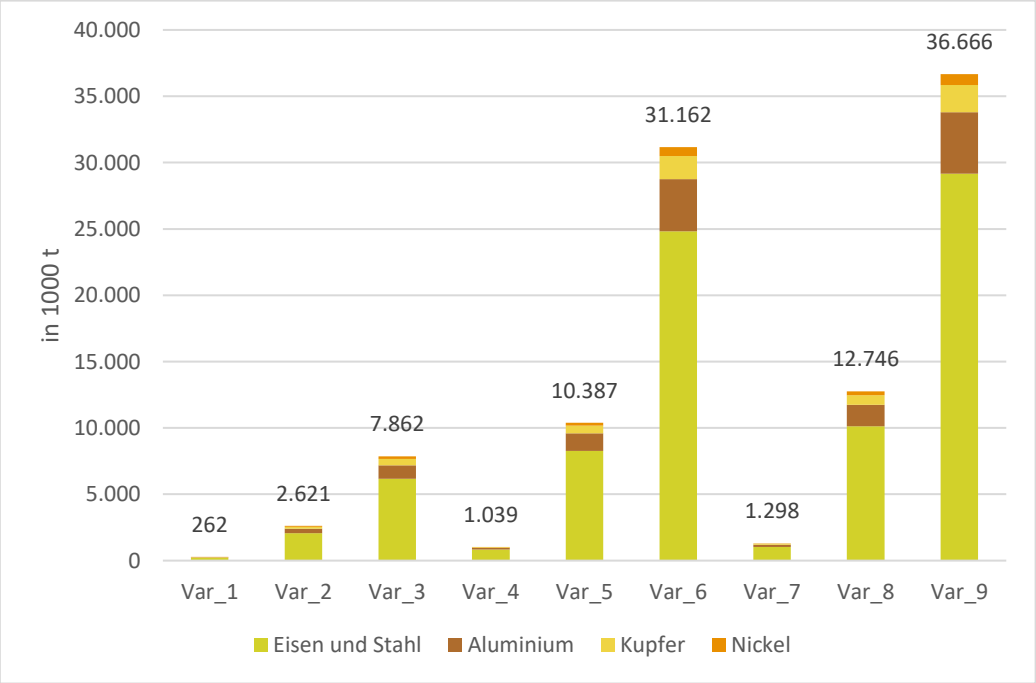
Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung ifeu auf Basis von (KBA o.J.; Öko-Institut e.V. et al. 2023)

Die Umverteilung von jährlich 1 Prozent der NZL der mittel bis großen Fahrzeuge in das Segment der Kleinfahrzeuge hat im Vergleich zur absoluten Verminderung der NZL um 1 Prozent einen geringeren Effekt. Kumuliert lassen sich in der ersten Variante (Var 1) ca. 262 kt Metalle einsparen; eine minimale Verminderung der Neuzulassungen (Var 4) spart hingegen bereits ca. 1.039 kt Metalle gegenüber dem Status Quo ein. Die Kombination dieser beiden Varianten (Var 7) würde den kumulierten Metallbedarf um knapp 1.300 kt im betrachteten Zeitraum reduzieren. Etwa 1.032 kt davon machen Eisen und Stahl aus, Aluminium etwa 164 kt, Kupfer ca. 74 kt und Nickel ca. 29 kt (siehe Abbildung 26).

Eine ambitionierte Umverteilung der Fahrzeuggrößensegmente hin zu mehr kleinen Pkw (Var 2) könnte gegenüber dem Status quo in den ausgewählten einzelnen Jahren etwa je 73 bis 115 kt Metalle einsparen. Kumuliert führt die Verminderung des mittleren und großen Fahrzeugsegments um je 10 Prozent zu Einsparungen von ca. 2,6 Mio. t Metallen. Die ambitionierte Verminderung der NZL um 10 Prozent (Var 5) führt zu deutlich verminderten Materialbedarfen pro Jahr, zwischen ca. 364-450 kt. Über den Zeitraum 2025 bis 2050 ließe sich der Metallbedarf in dieser Variante um 10,4 Mio. t vermindern. Die Kombination dieser beiden Varianten (Var 8) spart sogar 12,7 Mio. t Metall ein; ca. 10,1 Mio. t Eisen und Stahl und 1,6 Mio. t Aluminium, knapp 721 kt Kupfer und etwa 282 kt Nickel.

Wenn jährlich 30 Prozent der vorgesehenen mittleren und großen Pkw, als kleine Pkw neu zugelassen werden (Var 3) können im Zeitraum 2025-2050 knapp 7,8 Mio. t Metalle vermieden werden. Würden 30 Prozent weniger Neuzulassungen erfolgen (Var 6), ließen sich hingegen beachtliche 31,2 Mio. t Metalle (gegenüber dem Status Quo) einsparen. Die Kombination beider Varianten (Var 9) vermeidet gegenüber dem Status Quo im gesamten Zeitraum etwa 36,7 Mio. t Metalle.

Abbildung 26: Kumulierte Materialeinsparungen der Variationen 1 bis 9 von 2025 bis 2050 gegenüber dem Bedarf im Status Quo, differenziert nach Basismetallen



Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung ifeu auf Basis von (KBA o.J.; Öko-Institut e.V. et al. 2023)

Die Varianten zeigen, dass die Umverteilung der Größensegmente hin zu mehr kleinen Fahrzeugzulassungen anstelle von mittleren und großen Fahrzeugen ein effektiver Hebel zur Verminderung des Metallbedarfs sein kann. Noch größer ist jedoch der Hebel der direkten Verminderung der Neuzulassungen. Die Kombination beider Ansätze würde die Einsparpotenziale verstärken.

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der Einsparungen der neun Varianten gegenüber dem Status Quo in Rohmaterialäquivalenten.

Tabelle 6: Übersicht der Metalleinsparungen gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-9

	Variante	Eisen und Stahl	Aluminium	Kupfer	Nickel	Total
Rohstoff-bedarf	Status Quo	159.276	68.887	550.043	123.102	901.307
Einsparung ggü Status quo in vari-ante…	Var_1	396	179	1.512	349	2.436
	Var_2	3.962	1.785	15.122	3.493	24.364
	Var_3	11.887	5.356	45.367	10.480	73.091
	Var_4	1.593	689	5.500	1.231	9.013
	Var_5	15.928	6.889	55.004	12.310	90.131
	Var_6	47.783	20.666	165.013	36.931	270.392
	Var_7	1.985	866	6.998	1.577	11.425
	Var_8	19.494	8.495	68.614	15.454	112.058
	Var_9	56.104	24.415	196.770	44.267	321.556

Eigene Darstellung ifeu auf der Basis von (KBA o.J.; Öko-Institut e.V. et al. 2023; Schoer et al. 2024) Hinweis: Umrechnungskoeffizienten aus (Schoer et al. 2024) wurden herangezogen: Eisen 1,9 t RME/t Metallgehalt, Aluminium 5,3 t RME/t Metallgehalt, Kupfer 95,2 t RME/t Metallgehalt, Nickel 54,2 t RME/t Metallgehalt.

Auch in der Studie Modell Deutschland Circular Economy ist die Bevorzugung von kleineren Fahrzeugen eine Maßnahme zur Reduzierung des Rohstoffkonsums von Fahrzeugen. Der Studie zufolge könnte der Rohstoffkonsum bis 2045 durch Favorisierung von kleinen Fahrzeugen gegenüber großen Pkw um 1,6 Mio. t RME vermindert werden (Reduktion im Model Deutschland Circular Economy (MDCE) gegenüber dem „Weiter-so“ Szenario). (Tauer und Aechtner 2023) Ähnlich wie in den obigen Abschätzungen (Var 1-9) zeigt sich auch in der WWF-Studie, dass die direkte Verminderung des Individualverkehrs den stärksten Minderungseffekt erzielt. (Prakash et al. 2023)

Maßnahmen im Bereich Wohnungsbau

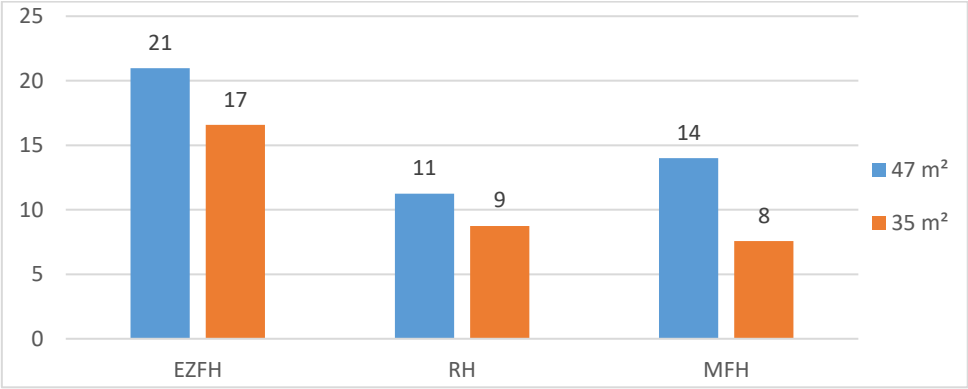
Der Neubau von Wohneinheiten ist rohstoffintensiv. Im Schnitt bedarf es für den Neubau einer Wohneinheit in einem Einfamilienhaus etwa 400 t Material. Für eine Wohneinheit in einem Mehrfamilienhaus (MFH) sind es ca. 270 t Material. Der Materialbedarf der MFH ist aufgrund der geringeren durchschnittlichen Wohnfläche und gemeinschaftlich genutzten Bereichen, wie Keller und Treppenhaus deutlich geringer als das Einfamilienhaus. (Zimmermann et al. 2023)[1]. Metalle machen etwa 4-5 Prozent des Materialbedarfs in Gebäuden aus (Heinrich 2019). Abbildung 27 zeigt die auf Basis von (Heinrich 2019; Zimmermann et al. 2023) geschätzten Metallbedarfe pro Wohneinheit in unterschiedlichen Gebäudetypen, basierend auf der durchschnittlichen Wohnfläche von 47 m². Wohnungen in Ein- und Zweifamilien- (EZFH) und Reihenhäuser (RH) benötigen im Schnitt mehr Metalle als vergleichsweise in einem Mehrfamilienhaus (MFH) benötigt werden. Eine Verminderung der durchschnittlichen Wohnfläche je Wohneinheit würde den Materialbedarf weiter senken. In

[1] Beide Angaben gehen von der derzeitig etablierten Bauweise und einer durchschnittlichen Wohnfläche von 47 m² aus. Die Berechnung des Materialbedarfs je Gebäude geht auf Daten des Neubaumodells des Wuppertal Instituts zurück. Das Modell basiert auf realen Beispielgebäuden unterschiedlicher Quellen der Fachliteratur (u.a. Weißenberger 2016).

Zimmermann et al. werden im Kontext von Suffizienzpotenzialen im Wohnungsbau Abschätzungen zu Materialbedarfen bei einer eine Absenkung der Wohnfläche auf 35 m² vorgenommen. (Zimmermann et al. 2023) Diese Untersuchungen werden für weitere Materialabschätzungen fortgeführt.

Würde die durchschnittliche Wohnfläche pro Person demnach von 47 m² auf 35 m² verringert werden, spiegelt sich dies in einem deutlich verminderten Materialbedarf wieder. Diese „Suffizienzvariante“ ist aufgrund der geringeren Pro-Kopf-Wohnfläche materialeffizienter. Beim Vergleich der Metallbedarfe je Wohneinheit (siehe Abbildung 27) sind MFH in beiden Ausführungsarten (47 m²/35 m²) weniger materialintensiv als EZFH und RH. (Zimmermann et al. 2023) Der Metallbedarf je Wohneinheit wird stark von Stahl dominiert (93 Prozent), Kupfer und Aluminium nehmen je 1 Prozent und sonstige Metalle wie (Titan-) Zink etwa 5 Prozent ein. (Heinrich 2019)

Abbildung 27: Metallbedarfe in t pro Wohneinheit (WE) für unterschiedliche Gebäudetypen[1]



Hinweis Abkürzungen: EZFH: Ein- und Zweifamilienhaus; RH: Reihenhaus; MFH: Mehrfamilienhaus. Eigene Berechnung auf Basis von Hinrich (2019) und Zimmermann et al (2022)

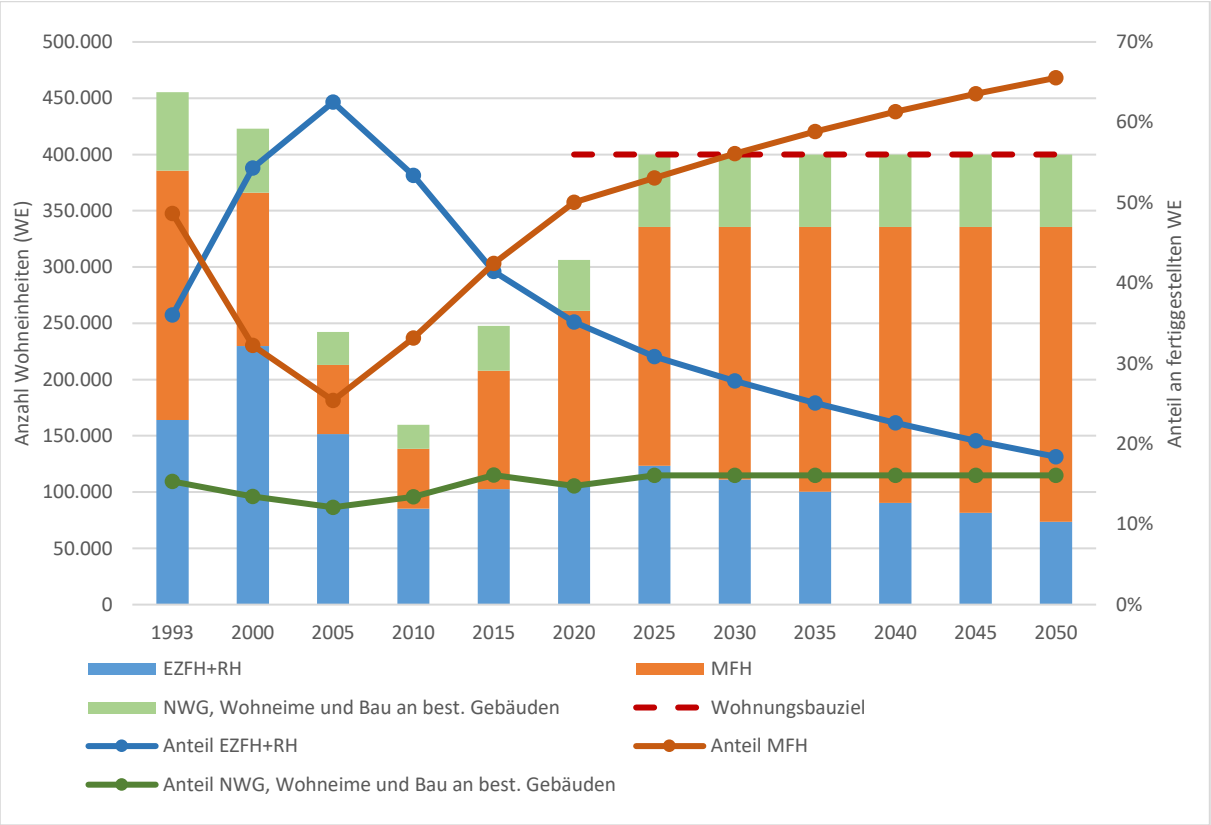
Daten des Statistischen Bundesamtes über die fertiggestellten Wohneinheiten zeigen deutlich, dass seit 1993 die Anzahl der neuen Wohneinheiten deutlich gesunken ist (siehe Abbildung 28). (Destatis 2023) 2010, beispielsweise, wurden lediglich 150.000 Wohneinheiten fertiggestellt, das entspricht rund einem Drittel der in 1993 fertiggestellten Wohneinheiten. Seither steigt die Anzahl wieder, verfehlt jedoch zum Stand heute das von der Bundesregierung gesetzte Ziel von 400.000 Wohneinheiten deutlich (siehe Abbildung 28).

Auch die Art der Wohnungen verändert sich; während Anfang der 90er Jahre noch Mehrfamilienhäuser (MFH) anteilsmäßig über den Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) liegen, liegt deren Anteil bis Anfang der 2010er Jahre über den Mehrfamilienhäusern. In den letzten Jahren steigt deren Anteil wieder kontinuierlich an. Abbildung 28 zeigt ab 2025 eine prognostizierte Entwicklung der Wohnungsanteile auf Basis der jährlichen Wachstumsrate seit 2000. EZFH und RH nehmen zwischen 2000 und 2020 jährlich etwa 2 Prozent ab. Diese Rate wird ab 2025 fortgeführt. Darauf aufbauend zeigt Abbildung 28 die Anzahl der fertiggestellten Wohneinheiten nach Typ, wenn davon ausgegangen wird, dass das (Bedarfs-) Ziel von 400.000 WE ab 2025 umgesetzt und erreicht wird. Der Anteil der Wohneinheiten

[1] Die Übertragung der durchschnittlichen Metallanteile zur Abschätzung des Metallbedarfs je Wohneinheit ist eine grobe Annäherung und beinhaltet Unsicherheiten.

in Nichtwohngebäuden (NWG), Wohnheimen und durch Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden wird konstant fortgeführt. In 2050 liegt der geschätzte Anteil der neu fertiggestellten WE in MFH bei 66 Prozent, WE in EZFH+RH liegen bei ca. 18 Prozent. Diese Schätzungen liegen innerhalb der Prognosen weiterer Studien, wie etwa (Zimmermann et al. 2023).

Abbildung 28: Historische (bis 2020) und geschätzte Entwicklung (ab 2025) der fertiggestellten Wohneinheiten und Anteile der Gebäudetypen an fertiggestellten Wohneinheiten



Eigene Darstellung und Berechnung auf Basis (Destatis 2022a, 2023; Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2022)

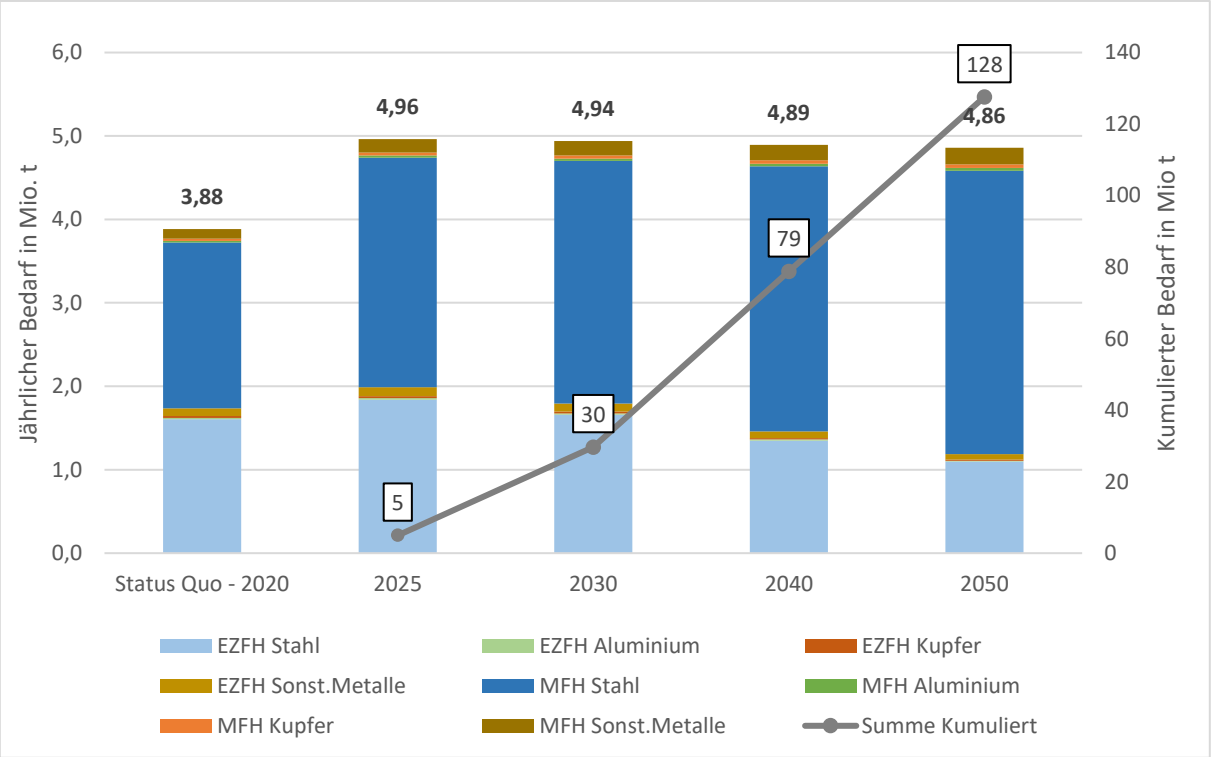
Die fortgeschriebene Entwicklung des Wohnungsneubaus, sowie die spezifischen Metallbedarfe je Gebäudeart (differenziert nach Metallen) werden als Grundlage genutzt, um die Materialbedarfe abzuschätzen, die für den Neubau von EZFH+RH und MFH anfallen[1]. Es wird dabei (zunächst) von einer durchschnittlichen Wohnfläche von 47 m² ausgegangen.

Abbildung 29 zeigt den Metallbedarf für ausgewählte Jahre sowie den kumulierten Metallbedarf (ab 2025) bis 2050. Diese Abschätzungen werden fortführend als Status Quo genutzt. Aktuell (2020) werden für den Bau der fertiggestellten Wohneinheiten etwa 3,9 Mio. t Metalle verbaut. Davon nimmt Stahl den größten Anteil ein, ca. 3,6 Mio. t. Fertiggestellt wurden in 2020 etwa 260.000 Wohneinheiten, deutlich weniger als das Bedarfsziel der 400.000 Wohnungen. Wird dieses – wie angenommen – in 2025 erreicht, steigt der Metallbedarf auf knapp 5 Mio. t an. Darunter etwa 4,6 Mio. t Stahl, 45.000 t Aluminium,

[1] Die Materialbedarfe für Wohnheime, NWG und Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden werden aufgrund einer fehlenden Datengrundlage folglich nicht berücksichtigt.

60.000 t Kupfer und knapp 270.000 weitere Metalle wie Zink. Bis 2050 sinkt der Materialbedarf - trotz insgesamt gleichbleibender Anzahl neugebauter Wohnungen - leicht, was auf den (moderat) steigenden Anteil der Wohnungen in den materialeffizienteren Mehrfamilienhäusern zurückzuführen ist (siehe Abbildung 28). Im Zeitraum 2025 bis 2050 beläuft sich die Menge an benötigtem Metall auf ca. 128 Mio. Tonnen.

Abbildung 29: Geschätzter Metallbedarf durch Neubau für ausgewählte Jahre bis 2050 im Status Quo



Eigene Berechnung auf Basis von (Destatis 2023; Heinrich 2019; Zimmermann et al. 2023)

Diese Abschätzungen verdeutlichen den hohen Materialbedarf des Wohnungsneubaus. Zur Erreichung des Wohnungsbauziels von 400.000 WE ist eine Steigerung der Wohnungsbauaktivitäten im Vergleich zu 2020 erforderlich. Der Neubau sollte im Rahmen einer flächensparsamen Umsetzung erfolgen. Die Fokussierung auf die Bauweise und Gebäudeart ist hier ein wichtiger Hebel. Ein Extrembeispiel verdeutlicht dies: Würden aus dem Wohnungsbauziel abgeleitet die 400.000 WE mit einseitigem Fokus auf EZFH gebaut, würden ca. 61 Mio. m² Wohnfläche geschaffen; bei einseitigem Fokus auf MFH etwa 31 Mio. m². Die Differenz von 30 Mio. m² entspricht ungefähr der in 2020 insgesamt geschaffenen Wohnfläche. (Destatis 2023; Zimmermann et al. 2023)

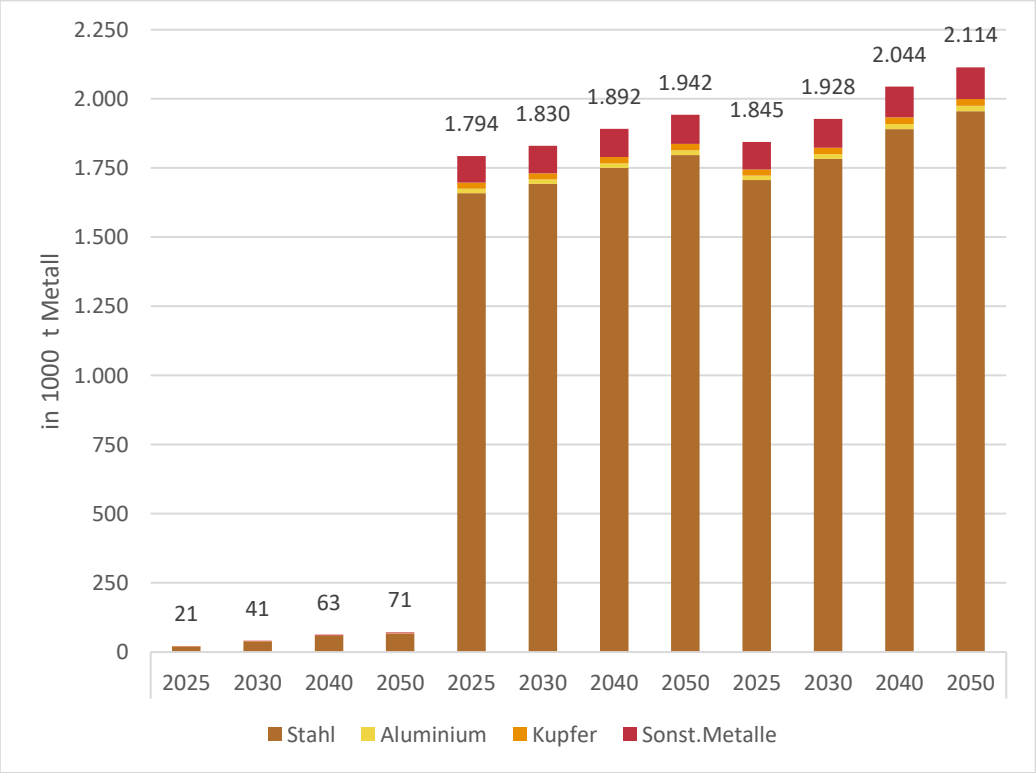
Interessant ist, dass sich die Wohnzufriedenheit kaum verändert, je größer die Wohnfläche pro Person ist. Seit 1993 steigt die Wohnfläche pro Kopf in Deutschland konstant an, von 35,4 m² pro Person auf ca. 47,7 m² pro Person in 2021 (Destatis 2022a; Rahlf 2015). Die Wohnzufriedenheit hingegen stagniert seit 2005 (bei einer Wohnfläche von ca. 41,2 m²) – trotz weiter steigender Wohnfläche - auf dem gleichen (hohen) Niveau (Liebig et al. 2022; Statista 2024). Die Verminderung der spezifischen Wohnfläche hat einen direkten Effekt auf den Materialbedarf pro Wohneinheit.

Vor diesem Hintergrund werden folglich in drei Variationen (Var 1 – 3) deren Effekt auf den Materialbedarf des Neubaus gegenüber dem Status Quo untersucht.

- **Var 1**: Fokussierung auf Neubau von MFH anstelle von EZFH+RH für Wohnungsbauziel. Die Entwicklung der leichten Abnahme des Anteils der EZFH (2 Prozent p.a. siehe Abbildung 28) an den fertiggestellten neuen Wohneinheiten wird verdoppelt (d.h. 4 Prozent Abnahme pro Jahr des EZFH Anteils zugunsten von MFH). In 2050 haben demnach MFH einen Anteil von 74 Prozent (statt 66 Prozent) an den Neubauten; EZFH+RH lediglich 10 Prozent (statt 18 Prozent). Der Anteil Bauvorhaben an bestehenden Gebäuden, Wohnheimen und NWG bleibt konstant bei 16 Prozent.
- **Var 2**: Ausgehend von der stagnierenden Zufriedenheit bei steigender Wohnfläche werden anstelle der durchschnittlichen Wohnungsfläche von 47 m² alle neuen Wohneinheiten mit einer durchschnittlich spezifischen Wohnfläche von 35 m² fertiggestellt und mit den verminderten Materialbedarfen (aus Zimmermann et al. (2023)) gerechnet (siehe Abbildung 27).
- **Var 3**: (Kombination von Var 1 und Var 2). Zusätzlich zur Verminderung der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person auf 35 m² (Var 2), wird auch der Anteil der zugebauten MFH beschleunigt (Var1).

Die Metallbedarfe der drei Variationen werden auf Basis der oben aufgeführten Informationen berechnet. Abbildung 30 zeigt die jährlichen Einsparungen der Variationen (Var 1 bis Var 3) gegenüber den Metallbedarfen des Status Quo. Abbildung 31 zeigt die kumulierten Einsparungen bis 2050.

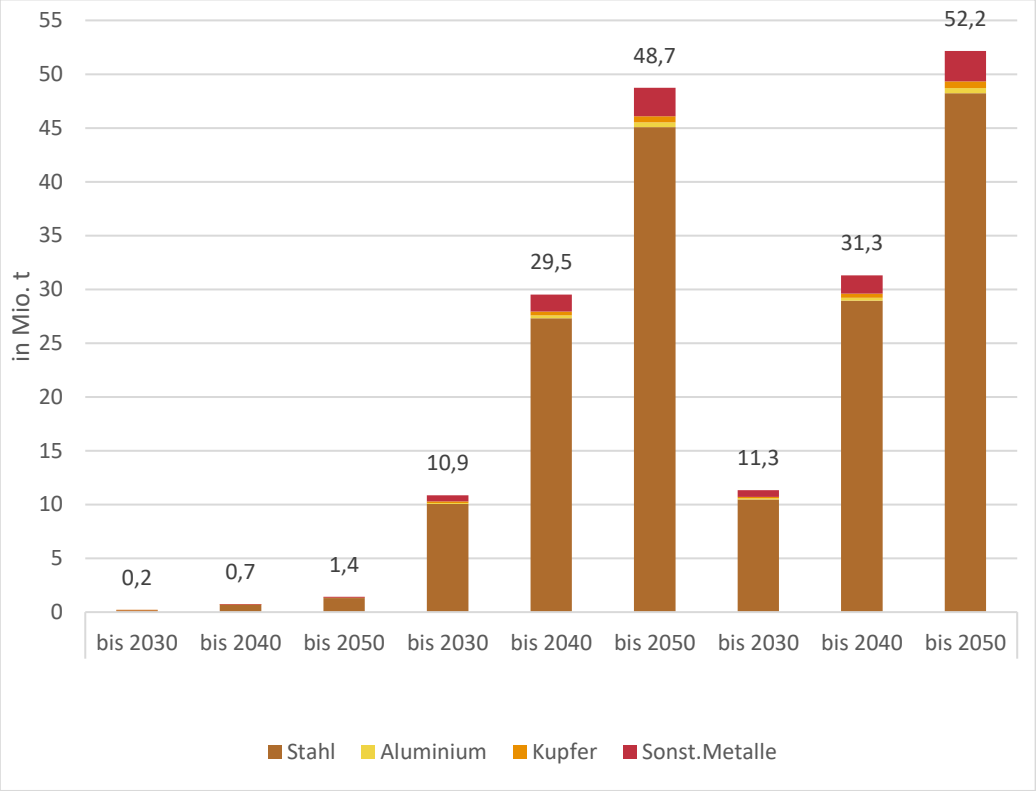
Abbildung 30: Jährliche Metalleinsparung in 1000 t Metall gegenüber dem Materialbedarf im Status Quo für Varianten 1 bis 3



Eigene Berechnungen auf Basis von (Destatis 2023; Heinrich 2019; Zimmermann et al. 2023)

In Variation 1 führt die beschleunigte Abnahme des Anteils von EZFH+RH zu einer Einsparung von knapp 21.000 t Metall in 2025. Im Jahr 2050 liegt die Einsparung gegenüber dem Status Quo bei etwa 71.000 t Metall. Kumuliert müssten (in Var 1) damit von 2025 bis 2050 etwa 1,4 Mio. t weniger Metall für den Wohnungsneubau aufgebracht werden – bei Einhaltung des Wohnungsbauziels von 400.000 WE. Demgegenüber stehen Materialeinsparungen bei Verringerung der spezifischen Wohnfläche auf 35m² pro Person. Bereits in 2025 würden in Variante 2 etwa 1,8 Mio. t weniger Metall in den Wohnungsbau fließen. Die Verminderung der Wohnfläche spart damit bereits im ersten Jahr der Umsetzung mehr Metalle ein, als Variante 1 im gesamten Zeitraum (2025 bis 2050). Bis 2050 würden in Variante 2 demnach kumuliert knapp unter 49 Mio. t weniger Metall benötigt. Die Kombination von Var 1 und Var 2 übertrifft diese Einsparung leicht; knapp 1,9 Mio. t weniger Metall in 2025 und 52 Mio. t Metalleinsparung im gesamten Zeitraum (2025-2050) würden gegenüber dem Status Quo bei konsequenter Umsetzung erzielt werden.

Abbildung 31: Kumulierte Metalleinsparungen in Mio. t Metall gegenüber Materialbedarf im Status Quo (ab 2025) für die Varianten 1 bis 3



Eigene Berechnungen auf Basis von (Destatis 2023; Heinrich 2019; Zimmermann et al. 2023)

Die Abschätzungen der Einsparungseffekte der Varianten 1 – 3 zeigen, dass die Verminderung der spezifischen Wohnfläche ein effektiver Hebel zur Einsparung von Material im Neubau ist. Auch die beschleunigte Verminderung des Anteils von Einfamilienhäusern am Neubau könnte – wie in den Berechnungen gezeigt wurde – ein wichtiger zusätzlicher Stellhebel zur Einsparung des jährlichen Metallbedarfs sein.

Tabelle 7 zeigt die Übersicht der Einsparungen umgerechnet in Rohmaterialäquivalente für den betrachteten Zeitraum der drei Varianten.

Tabelle 7: Übersicht der Metalleinsparungen im Wohnungsbau gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-3

	Variante	Total	Eisen/ Stahl	Aluminium	Kupfer
Rohstoff-bedarf	Status Quo	376.021	224.201	6.085	145.734
Einsparung ggü. Status Quo in…	Var 1	4.174	2.489	68	1.618
	Var 2	143.635	85.642	2.324	55.668
	Var 3	153.718	91.654	2.488	59.576

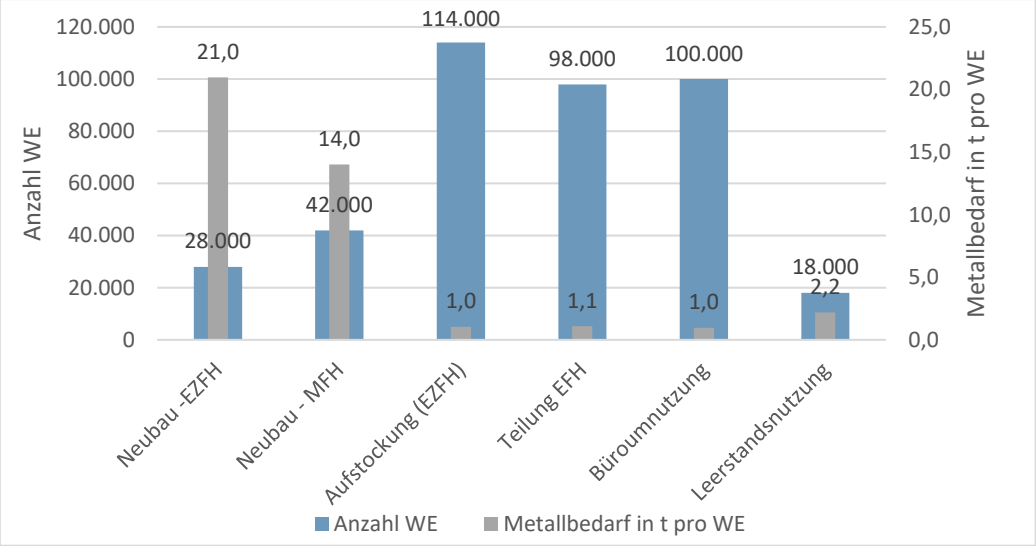
Eigene Berechnungen auf Basis von (Destatis 2023; Heinrich 2019; Schoer et al. 2024; Zimmermann et al. 2023) Hinweis: Umrechnungskoeffizienten aus (Schoer et al. 2024) wurden herangezogen: Eisen 1,9 t RME/t Metallgehalt, Aluminium 5,3 t RME/t Metallgehalt, Kupfer 95,2 t RME/t Metallgehalt, Nickel 54,2 t RME/t Metallgehalt.

Aufgrund der enormen Mengen an Rohstoffen, die im Wohnungsbau umgesetzt werden, sind folglich auch Einsparpotenziale besonders hoch. In der Studie Modell Deutschland Circular Economy des WWF wird beispielsweise gezeigt, dass der größte Rückgang des Rohstoffkonsums im Hochbau erzielt werden kann (Prakash et al. 2023). Der Rohstoffkonsum (mit Rucksack) sinkt im Circular Economy Szenario (MDCE) gegenüber dem „Weiter so“ Szenario um knapp 50 Mio. Tonnen. Der entscheidende Hebel ist für den Bereich Wohnen demnach der Rückgang der Wohn- und Büroflächen; hierdurch werden etwa ca. 34 Mio. Tonnen vermindert. (Prakash et al. 2023) Weitere Maßnahmen zur Verminderung des Rohstoffkonsums im Bereich Hochbau sind die verstärkte Wiederverwendung von Bauteilen (durch Design und standardisierte Bauelemente, die die Demontage von Gebäuden und das Recycling von Materialien begünstigen), eine verlängerte Lebensdauer von Gebäuden (etwa durch Renovierung und durch Design beim Bau des Gebäudes, welches Renovierungen erleichtert), eine Reduktion des Einsatzes von Baustahl und Strukturbeton durch Design (durch verringerte Überspezifikation und Leichtbau) sowie die Wiederverwendung von Baustahl. (Prakash et al. 2023)

Eine Verminderung des Zubaus von neuen Wohnflächen lässt sich durch Ausnutzung diverser Suffizienzansätze erreichen. Zimmermann et al. (2023) beschreiben in ihrer Studie Potenziale, die den Neubaubedarf vermindern. Dazu zählen die Umnutzung von Büroflächen, die Nutzung von Leerstand im ländlichem Raum, die Aufstockung von Wohn- und Nichtwohngebäuden, sowie die Teilung von Ein- oder Zweifamilienhäusern. Anstelle der pro Jahr 400.000 vorgesehenen neuen Wohneinheiten verbleiben durch diese Ansätze laut den Autor*innen lediglich ein theoretisch verbleibender Neubaubedarf von 70.000 Wohneinheiten. (Zimmermann et al. 2023)

Die folgende Abbildung 32 zeigt die in Zimmermann et al. (2023) abgeleitete Verteilung der Wohnungseinheiten durch konsequente Umsetzung der oben genannten Suffizienzansätze. Demnach werden etwa 114.000 WE durch Aufstockung von EZFH verfügbar, 98.000 WE entstehen durch Teilung von EFH, 100.000 WE erschließen sich durch Umnutzung von Büroflächen und etwa 18.000 WE durch Ausnutzung von Leerstand. Zur Erreichung des Wohnungsbauziels beschränkt sich der notwendige Neubau in diesem Suffizienz-Szenario auf lediglich 28.000 WE in EZFH und 42.000 WE in MFH. Die spezifischen Metallbedarfe der Suffizienzmaßnahmen wurden auf Basis von Heinrich (2019) und Zimmermann et al. (2023) geschätzt und sind ebenfalls in Abbildung 32 dargestellt.

Abbildung 32: Anzahl der WE im Suffizienz-Szenario und spezifische Metallbedarfe

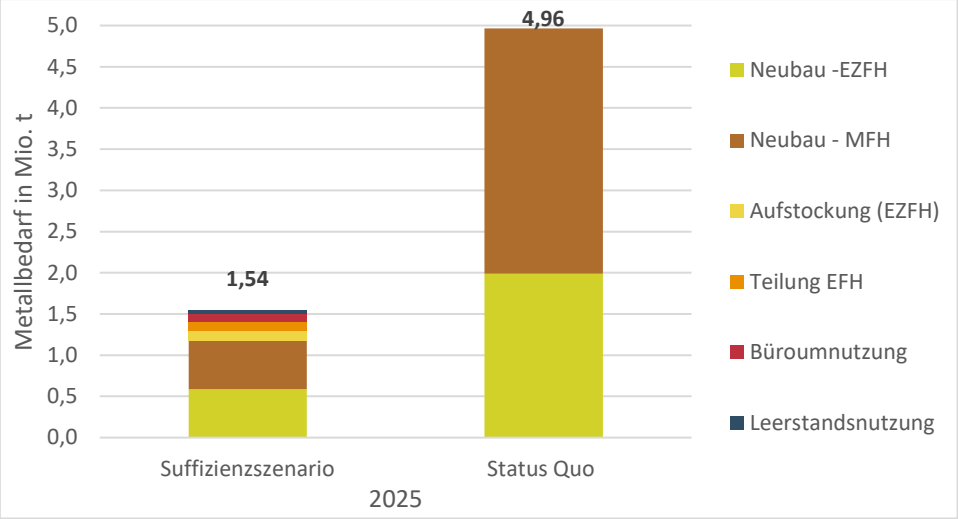


Quelle: Eigene Darstellung und Berechnung auf der Basis von (Heinrich 2019; Zimmermann et al. 2023)

Ausgehend von den spezifischen Metallbedarfen je WE und Maßnahme (Aufstockung, Teilung, Neubau etc.) und der entsprechenden Anzahl an Wohneinheiten, lässt sich der jährliche Metallbedarf dieses Suffizienz-Szenarios ableiten. Der Vergleich mit dem Metallbedarf des Status Quo (im Jahr 2025, siehe Abbildung 29) durch den Neubau von EZFH und MFH zeigt eine deutliche (theoretische) Einsparung des Materialbedarfs bei Umsetzung der Suffizienzansätze (siehe Abbildung 33).

Der Metallbedarf im Suffizienz-Szenario durch den Neubau von 70.000 WE, sowie Maßnahmen zur Teilung, Aufstockung, oder Umnutzung beläuft sich auf etwa 1,5 Mio. t Metalle. Die Neubaumaßnahmen dominieren diesen Bedarf deutlich. Die Metallaufwendungen der Suffizienzmaßnahmen belaufen sich zusammen auf etwa knapp 360.000 t. Im Jahr 2025 würde im Vergleich zum Status Quo - der einen deutlich höheren Umfang von Neubau bedarf - der Metallbedarf um 3,43 Mio. t höher ausfallen. Die konsequente Umsetzung würde damit zu einer deutlichen Verminderung des Metallbedarfs im Bereich Wohnen führen.

Abbildung 33: Metallbedarf im Suffizienz-Szenario und im Status Quo im Jahr 2025



Hinweis: Im Status Quo ist ausschließlich der Metallbedarf durch Neubau von EZFH und MFH enthalten, weitere Materialbedarfe (u.a. Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden, NWG) sind noch nicht enthalten. Der tatsächliche Materialbedarf im Status Quo fällt daher noch höher aus. Eigene Darstellung und Berechnung auf der Basis von (Destatis 2023; Heinrich 2019; Zimmermann et al. 2023)

Bei Wohnungsgebäuden kann eine effizientere Nutzung bestehender Wohnflächen politisch auch indirekt durch die Förderung von modularen Bauweisen erreicht werden. Modulare Bausysteme zeichnen sich u.a. dadurch aus, dass sie eine flexible(re) Wohnraumgestaltung ermöglichen, die sich an veränderte Nutzungsbedürfnissen besser anpassen lässt. In einer Studie von (Kamali et al. 2019) wurde die modulare Bauweise ökobilanziell mit einem konventionellen Gebäude verglichen und festgestellt, dass modulare Gebäude tatsächlich mit Hinblick auf mehrere Umweltwirkungen Vorteile gegenüber konventionellen Bauweisen haben können. Jedoch ist auch wichtig zu benennen, dass das Design der Modulbauweise ein wichtiger Faktor ist, der den ökologischen Vorteil maßgeblich bestimmt und die modulare Variante nicht immer der konventionellen Bauweisen überlegen ist. (Kamali et al. 2019)

Infobox: Primärbaustoffsteuer

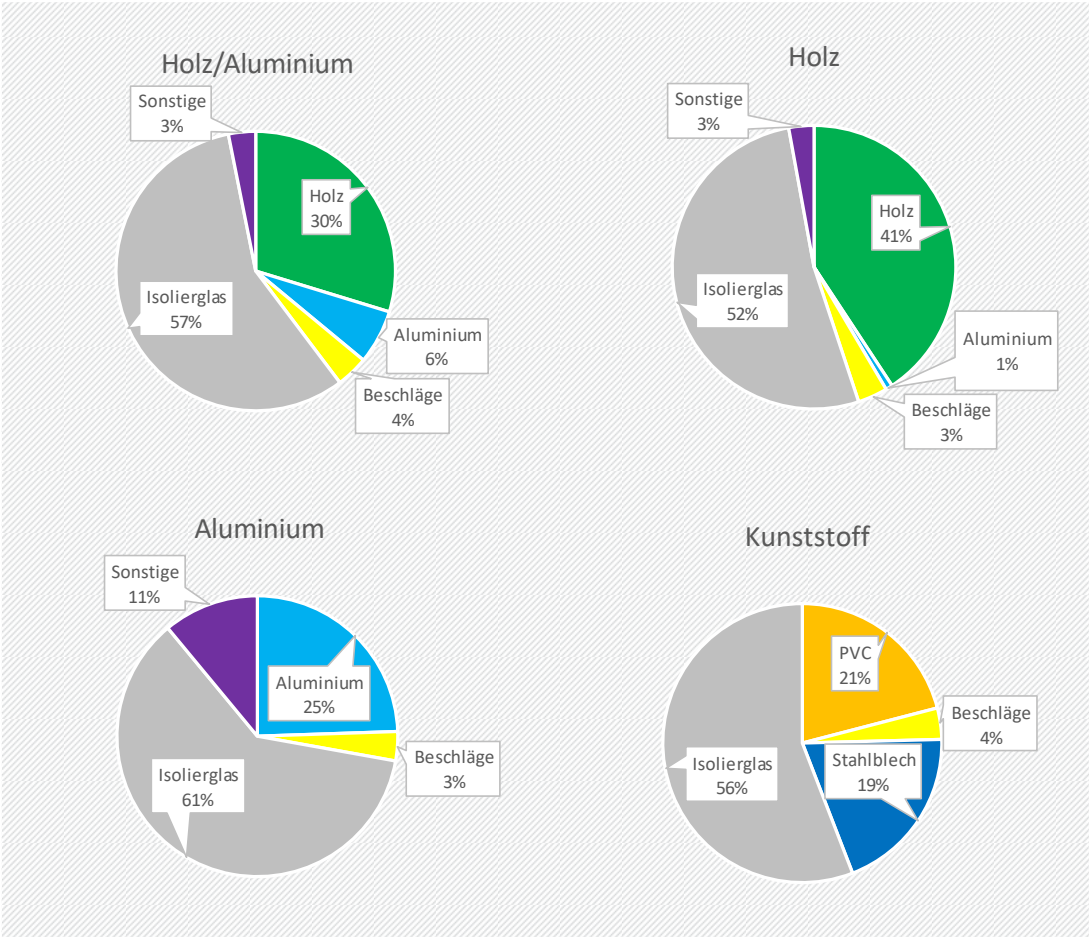
Um die Stoffströme speziell im Bauwesen gezielt zu lenken, stellen Subventionen und Besteuerung zusätzliche Instrumente neben den bereits auf verschiedenen Ebenen geltenden Rechtsnormen[1] dar. (Heinrich 2019) Eine Primärbaustoffsteuer ist ein Instrument, was u.a. im Projekt „MaRess“ für das Umweltbundesamt mit Hinblick auf die Erhöhung der Ressourceneffizienz im Baubereich untersucht wurde. (Sanden et al. 2010) Die Baustoffsteuer könnte die preislichen Nachteile von Sekundärbaustoffen gegenüber Primärmaterial ausgleichen, und somit den Einsatz von Recyclingmaterial fördern. (UBA 2019b) Dies bedeutet auch einen Schritt hin zu einer rohstoffbezogenen Besteuerung anstelle von arbeitsbezogenen Steuern. (Heinrich 2019) Potenzialanalysen zur Senkung der Metallinanspruchnahme durch eine solche Steuer liegen jedoch nicht vor. Mit Blick auf mineralische Rohstoffe zeigen (Buchert et al. 2016), dass sich durch eine Primärstoffsteuer, gemeinsam mit weiteren Maßnahmen, der Primärkiesbedarf bis 2049 um die Hälfte verringern ließe. (Buchert et al. 2016)

Fenster und Rahmen

Ein weiterer Aspekt in Bezug auf Einsparmöglichkeiten der Rohstoffnutzung im Bereich Gebäude sind Fenster. Bei der stofflichen Zusammensetzung von Fenstern wird hauptsächlich zwischen vier Fenstertypen unterschieden, bei denen entweder ein Holz/Aluminium-, Holz-, Aluminium- oder Kunststoffrahmen verbaut wird. Die vier Fenstertypen unterscheiden sich dabei neben anderen Aspekten vor allem in Bezug auf Kosten und Wärmedämmung. So weisen Fensterrahmen aus Holz die beste Wärmedämmung auf, haben aber auch den höchsten Preis und sind witterungsanfällig. Kunststoffrahmen schneiden dagegen etwas schlechter bei der Wärmedämmung ab, sind aber die günstigste Variante, während Aluminium dazwischen liegt (Dämmen und Sanieren 2023).

Abbildung 34 zeigt die stoffliche Zusammensetzung der vier Fenstertypen. Mit insgesamt 38,4 Kilogramm/m² Fensterfläche sind Fenster mit Holzrahmen die insgesamt schwersten Fenstertypen, gefolgt von 35,8 Kilogramm/m² bei Kunststoff-Fenstern und 34,9 Kilogramm/m² Holz/Aluminium-Fenstern. Der leichteste Fenstertyp ist Aluminium mit insgesamt 32,7 Kilogramm/m². Isolierglas macht mit 20 Kilogramm/m² den massemäßigen Hauptanteil der enthaltenen Stoffe aller vier Fenstertypen aus (52 – 61 Prozent). Aluminium ist vor allem im Fenstertypen Aluminium (24 Prozent) ein Hauptbestandteil. Es ist ebenfalls im Fenstertyp Holz/Aluminium (6 Prozent) und zu geringen Anteilen auch in Fenstertyp Holz (1 Prozent) verbaut. Lediglich der Fenstertyp Kunststoff enthält kein Aluminium. Nur in diesem ist wiederum Stahlblech (20 Prozent) verbaut (Heinrich 2019).

Abbildung 34: Stoffliche Zusammensetzung verschiedener Fenstertypen



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Heinrich 2019)

Der Absatz von Fenstern in Deutschland lag 2022 bei ca. 15,5 Mio. Fenstereinheiten (FE),[1] davon wurden ca. 39 Prozent im Neubau und 61 Prozent für Modernisierung verwendet. Er liegt damit leicht unter dem Vorjahreswert von 15,8 Mio. FE und über dem Wert von 2019 mit 14,9 Mio. FE (Glaswelt 2023). Von den in Deutschland produzierten Fenstern, hatten 2016 ca. 54 Prozent einen Kunststoffrahmen, 20Prozent einen Aluminiumrahmen, 16 Prozent einen Holz- und 9 Prozent einen Holz/Aluminiumrahmen (statista 2017).[2]

Abbildung 35 zeigt die enthaltenen Materialien der in 2022 verkauften Fenster, differenziert nach Rahmentyp. Hierfür wurde die stoffliche Zusammensetzung der vier Fenstertypen aus Abbildung 34 übernommen. Zusätzlich wurde die Produktionsstatistik aus 2016 genutzt (statista 2017), um den gesamten Absatz auf die vier Fenstertypen zu Verteilen. Aus Mangel an entsprechenden Daten wurde hierbei vereinfachend

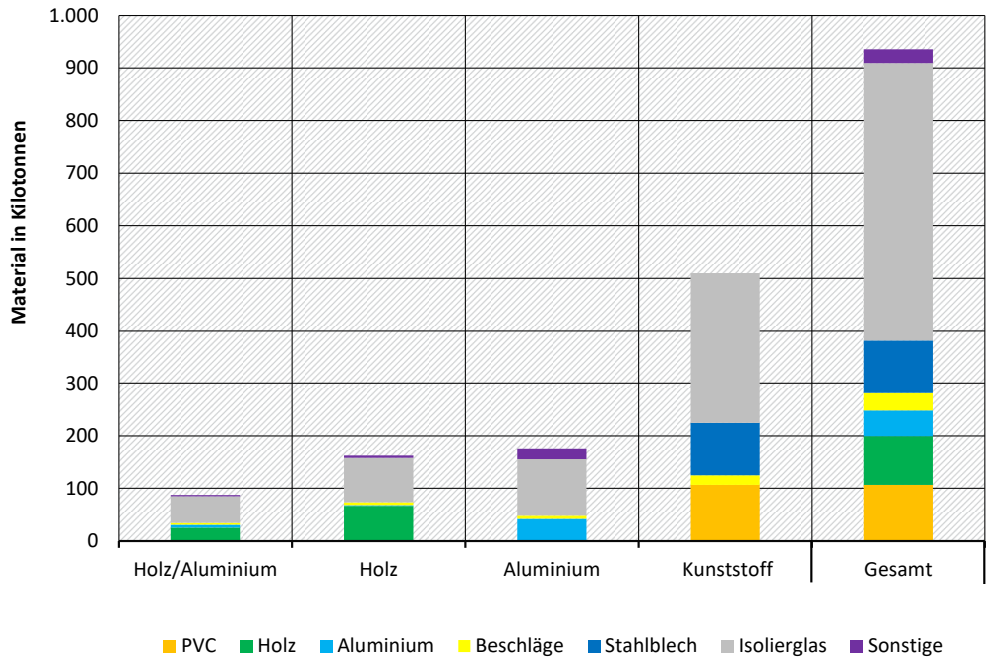
[1] Eine Fenstereinheit entspricht 1,3 x 1,3 m = 1,69 m² (Glaswelt 2023; statista 2017)

[2] Es wurde auf die Daten aus 2016 zurückgegriffen, da keine aktuelleren Daten vorlagen. Bei einem Vergleich mit der prognostizierten Absatzmenge von Fenstern mit Kunststoffrahmen für 2023 lässt sich allerdings feststellen, dass der Marktanteil mit 54 Prozent (Gebäude Energieberater 2023) dem Anteil an der Produktion in Deutschland 2016 entspricht.

angenommen, dass die Zusammensetzung importierter Fenster dem Verhältnis an Fenstertypen aus der Produktion innerhalb von Deutschland entsprechen.

Da Kunststofffenster mehr als die Hälfte aller verkauften Fenstereinheiten ausmachen (s.o.), ist der Materialbedarf durch die verbauten Materialen dieses Typs geprägt. Insgesamt liegt der Materialbedarf bei 936 Kilotonnen, etwa die Hälfte davon Isolierglas (56 Prozent). Der Bedarf für PVC (107 Kilotonnen) und für Holz (92 Kilotonnen) liegt auf einem ähnlichen Niveau wie der Bedarf an Stahlblech (100 Kilotonnen), welcher etwa doppelt so hoch liegt wie der Aluminiumbedarf (50 Kilotonnen).

Abbildung 35: Stoffliche Zusammensetzung der 2022 in Deutschland verkauften Fenstertypen in Kilotonnen



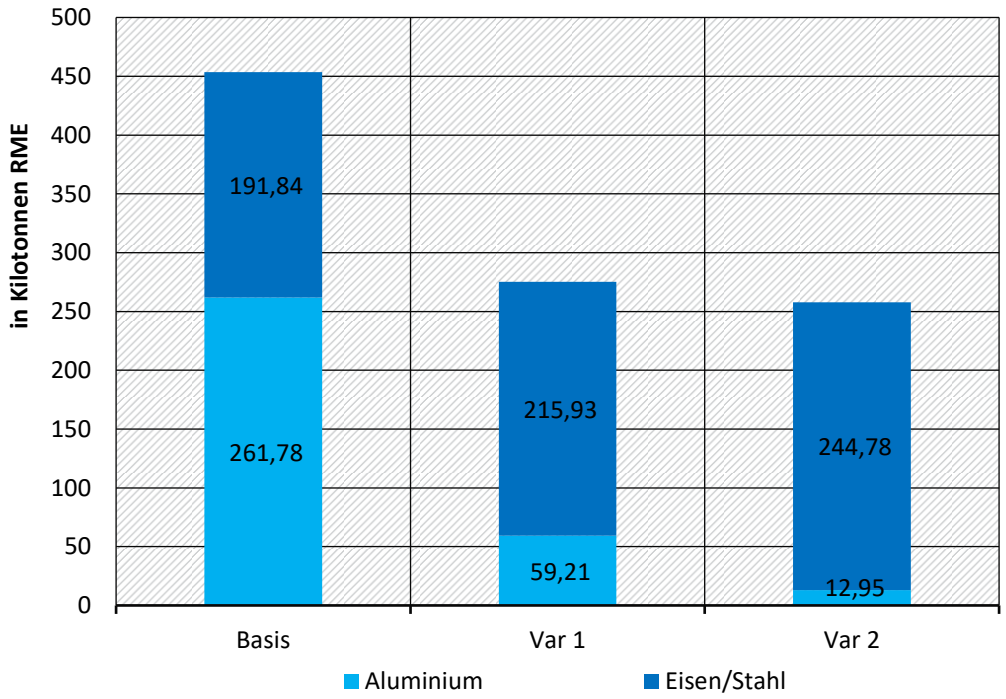
Quelle: eigene Darstellung und Berechnung auf Basis von (Glaswelt 2023; Heinrich 2019; statista 2017)

Abbildung 36 zeigt die Basismetalle in Kilotonnen RME, die in den 2022 in Deutschland verkauften Fenstern enthalten sind. Hierbei entspricht Basis den oben beschriebenen Berechnungen der stofflichen Zusammensetzung aus Abbildung 35. Darüber hinaus wurden zwei alternative Varianten berechnet, in denen das Ersetzen von Fenstertypen mit hohem Aluminiumanteil angenommen wurden. In Variante 1 (Var 1) wurden die verkauften Fenstereinheiten der Kategorie Aluminium jeweils zu gleichen Teilen den drei anderen Fenstertypen zugerechnet und auf null gesetzt. In Alternativ-Variante 2 (Var 2) wurden sowohl die verkauften Fenster des Typs Aluminium als auch die des Typs Holz/Aluminium gleichteilig den Kategorien Holz- und Kunststoff-Fenster zugerechnet und auf null gesetzt.

Da Aluminium einen deutlich höheren Rohstoffrucksack (RME-Koeffizienten) besitzt als Stahl, sinkt durch die Einsparung an Aluminium erwartungsgemäß der gesamte Rohstoffaufwand in den alternativen Varianten. Im Vergleich zum Rohstoffbedarf an Metallen des Basisszenarios (insgesamt 454 Kilotonnen RME) lässt sich daher sowohl für ie Var 1 (insgesamt 275 Kilotonnen RME) als auch Var 2 (insgesamt 258 Kilotonnen

RME) eine deutliche Reduktion von 39 Prozent bzw. 43 Prozent feststellen. Im Vergleich zwischen Var 1 und Var 2 zeigt sich, dass eine weitere Reduktion des Aluminiumbedarfs, durch den Verzicht auf Fenster des Typs Holz/Aluminium, dagegen einen deutlich geringeren zusätzlichen Nutzen hat. Hier wird die Einsparung durch eine weitere Reduktion an benötigtem Aluminium zu großen Teilen durch die gestiegene Nachfrage nach Eisen bzw. Stahl kompensiert.

Abbildung 36: Bedarf an Basismetallen der 2022 in Deutschland verkauften Fenster in Kilotonnen RME



Quelle: eigene Darstellung und Berechnung auf Basis von (Glaswelt 2023; Heinrich 2019; statista 2017)

Einsparpotenziale im Bereich Gesundheitssektor

Krankenhäuser und Arztpraxen benötigen viele Metalle; Metalle kommen in unterschiedlichsten Produktgruppen zum Einsatz z.B. in Form von Metallverpackungen, OP-Instrumente, Implantaten, Elektronikgeräten, Kabeln und Rohren, oder Herzkatheter und Strahlenschutzkleidung. (abfallmanager-medizin.de 2023) Sie haben zudem ein beachtliches Abfallaufkommen. Mit ca. 4,8 Mio. Tonnen[1] jährlich sind Krankenhäuser der fünftgrößte Abfallproduzent in Deutschland – nach Baubranche, Handel, Gewerbe und Bergbau. Etwa fünf bis sechs Kilogramm Abfall entstehen jeden Tag pro Krankenhausbett. (abfallmanager-medizin.de 2019) Das ist mehr als viermal so viel wie das durchschnittliche Abfallaufkommen pro Kopf in den privaten Haushalten. (Destatis 2022b) Auch die Kosten der Abfallentsorgung sind dementsprechend hoch; pro Jahr fallen etwa 800 € je Krankenhausbett an. (abfallmanager-medizin.de 2019)

[1] In Krankenhäusern fallen neben ca. 30 % krankenhausspezifischen Abfällen aus dem Pflege- und Behandlungsbereich überwiegend hausmüllähnliche Abfälle an (ca. 60 %). Etwa 10 % sind gefährliche Abfälle und beinhalten zu 3 % infektiöse und 7 % schadstoffhaltige Abfälle. (UBA o.J.)

Insbesondere die Verwendung von Einwegprodukten trägt zum hohen Abfallaufkommen bei. Zwar geben 70 Prozent der Kliniken an, Mehrwegprodukte zu nutzen[1], doch es zeichnet sich ein steigender Trend zugunsten der Nutzung von Einwegprodukten wie Scheren, Pinzetten und anderen Instrumenten in Krankenhäusern und Arztpraxen anstelle von Mehrwegvarianten ab. Verlässliche Zahlen zu den tatsächlich im Umlauf befindenden Einwegbestecken gibt es nicht. Die Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS) geht davon aus, dass in Deutschland jährlich allein in Krankenhäusern 8.000 Tonnen Einweginstrumente aus Chromstahl weggeworfen werden. Schätzungsweise 15 Mio. Einheiten Einwegscheren, Pinzetten und andere Instrumente werden jedes Jahr im Klinikmüll entsorgt. (abfallmanager-medizin.de 2020; IWKS o.J.) Ein Anreiz zur Verwendung von Einwegprodukten in Kliniken ist, dass die Verantwortung zur Einhaltung der gesetzlichen Auflagen für die Sterilisation beim Hersteller liegt. (Sokolow 2020)

Die Einwegbestecke sind in der Regel aus Stahl oder Kunststoff (Polymer) hergestellt. Metallische Bestecke enthalten Chrom als Rostschutz. Dieses geht aufgrund der nicht etablierten separaten Sammlung quasi verloren bzw. das bei der Einschmelzung wiedergewonnene Metall wird meist nur als Baustahl genutzt, wo die Legierung keine Rolle mehr spielt. Diese Praxis ist nicht im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Um dieses Downcycling zu verhindern gibt es bereits einzelne Projekte, die eine getrennte Sammlung von metallischem Einwegbesteck mit anschließender Verwertung umsetzen. (abfallmanager-medizin.de 2020)

Zu nennen ist beispielsweise das Sammelsystem SReS®, welches vom Institut für Recycling, Ökologie, Design (IRED) und der Fraunhofer-Projektgruppe IWKS für einen Klinikversorger entwickelt wird. Es handelt sich um einen zertifizierten Recycling-Pfad für chirurgische Einweginstrumente aus Edelstahl zur Erhaltung des Wertstoffkreislaufs. Ziel ist es, ein wirtschaftlich tragfähiges Rücknahmesystem für gebrauchte medizinische Metalle aus Kliniken aufzubauen, um neben ökologischen Vorteilen den Kliniken auch einen ökonomischen Anreiz durch Verminderung der Entsorgungskosten zu bieten. (IWKS o.J.) Auswertungen und Ergebnisse des Projekts liegen noch nicht vor.

Einen ähnlichen Weg geht auch das Universitätsklinikum Bonn (UKB): als erste deutsche Klinik wurde dort 2022 das Recycling chirurgischer Einweggeräte wie Klammernahtgeräte und Ultraschallscheren eingeführt. Solche nichtinfektiösen Einweggeräte (u.a. auch Pinzetten, Klemmen, Petrischalen und Anästhesiezubehör) werden in der Mikrobiologie des UKB sterilisiert und von einer Entsorgungsfirma abgeholt und anstelle der bisherigen Verbrennung erfolgt ein mechanisches Recycling. Etwa 80 Prozent des Materials kann somit stofflich wiederverwertet werden. Hochrechnungen des Klinikums zufolge können etwa 40.000 Kilogramm CO_2 pro Jahr durch das recycelte Metall eingespart werden, wenn das System an zehn Kliniken umgesetzt würde. (ukbnewsroom 2022)

Neben der Etablierung solcher ökologisch sinnvollen Recyclingpfade für Kliniken, ist ein weiteres wichtiges Ziel, dass die Zahl der verwendeten Einweginstrumente aus Edelstahl wieder zurückgeht. Wenn etwa aufgrund von Hygiene- oder Logistikaspekten keine Mehrweginstrumente eingesetzt werden können, ist ein wichtiger Schritt, zu prüfen, wo anstelle von metallischen Einwegprodukten besser Kunststoffprodukte eingesetzt werden können. Beim Drapieren von Wundauflagen muss beispielsweise keine Pinzette aus Stahl genutzt werden, sondern ein Instrument aus Kunststoff ist ebenso ausreichend. (Sokolow 2020)

[1] Basierend auf einer Umfrage aus dem Jahr 2014

Da in Krankenhäusern und Praxen eine Vielzahl unterschiedlicher Abfälle anfallen, gibt es neben der Verminderung metallischer Abfälle auch für weitere Produktgruppen Wiederverwendungspotenziale. Die Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) nennt beispielsweise den Einsatz von wiederverwendbarer OP-Wäsche, wiederverwendbaren Kompressen oder wiederverwendbaren Windeln in pädiatrischen Einrichtungen. (BGW 2023)

Insgesamt bedarf es zur quantitativen Abschätzung der Einsparpotenziale im Gesundheitssektor eine bessere Datengrundlage zu den derzeitigen Stoff- und Materialströmen.

5 Fazit und Politikempfehlungen

Der Rohstoffkonsum in Deutschland liegt mit etwa 16 t Rohstoffe (mit Rucksack) pro Person deutlich über dem weltweit durchschnittlichen Wert und überschreitet das nachhaltige Maß. Dies zeichnet sich in diversem Umweltschäden nieder, die mit der Extraktion, Aufbereitung, Verarbeitung und Entsorgung von Rohstoffen und Gütern einhergeht. Metalle tragen hierzu einen wesentlichen Anteil bei. Bezeichnend ist, dass Umweltschäden wie etwa bei der Extraktion der Erze nicht bei uns in Deutschland anfallen, sondern fernab unseres täglichen Konsums, weitestgehend in Ländern des globalen Südens. Unser Metallkonsum lässt sich auf nur weniger Basismetalle zurückführen; Eisen, Aluminium, Kupfer und Nickel dominieren den metallischen Rohstoffkonsum. Diese Studie richtet daher den Blick auf Potenziale zur Verminderung des Metallbedarfs dieser vier Metalle und zeigt für verschiedene Sektoren und Produktbeispiele auf, durch welche Stellhebel Einsparungen erreicht werden könnten.

Die aufgezeigten Einsparmöglichkeiten stellen theoretische Potenziale dar, die durch politische Instrumente und Maßnahmen in der Praxis umgesetzt werden können. Die Verminderungspotenziale basieren auf unterschiedlichen Annahmen und Berechnungsmethoden, beziehen sich auf teils unterschiedliche Zeiträume und nutzen verschiedene Datengrundlagen, daher lassen sich die Werte nur eingeschränkt direkt miteinander vergleichen. Die Abschätzungen machen aber deutlich, in welchen Bereichen besonders hohe Materialeinsparungspotenziale liegen und wie die Potenziale je nach Ambitionsniveau der Implementierung unterschiedlich hoch ausfallen. Im Folgenden werden auf Basis der spezifischen Ergebnisse der untersuchten Bereiche politische Empfehlungen abgeleitet.

Zunächst wurde untersucht, welcher Effekt durch die **Verlängerung der Nutzungsdauer von Gütern** auf den Rohstoffkonsum zu erwarten ist. Die (theoretische) Verdoppelung der Nutzungsdauer von in Deutschland genutzten IKT Geräten (der privaten Haushalte) in einem Jahr würde ohne Berücksichtigung von Rebound-Effekten eine Verminderung des metallischen Rohstoffkonsums um 1,1 Mio. Tonnen (mit Rucksack) bedeuten (minus 0,2 Prozent Abnahme des RMC). Als konkretes Beispiel wurde für **Smartphones** berechnet, welchen Effekt eine Verdoppelung der Nutzungsdauer (von derzeit ca. zwei auf vier Jahre) der aktuell genutzten Smartphones in Deutschland hat. Der verminderte Rohstoffbedarf beläuft sich auf etwa 16.800 Tonnen RME (basierend auf den Daten im Jahr 2022). Tabelle 8 fasst die Rohstoffbedarfe für das Smartphone-Beispiel zusammen.

Tabelle 8: Übersicht der Rohstoffbedarfe in t RME bei Smartphones

	Eisen und Stahl	Aluminium	Kupfer	Total
Status Quo	583	3.629	29.322	33.534
Variante: Verdopplung der durchschnittlichen Nutzungsphase von Smartphones in Deutschland von 2 auf 4 Jahre	291	1.814	14.661	16.767

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von (Rizos et al. 2019; Schoer et al. 2024; statista 2023b)

Aufgrund des relativ konstanten Anteils an Smartphone-Nutzenden und jährlichen Verkaufszahlen in Deutschland über die letzten Jahre ist davon auszugehen, dass der Anteil an Erstkäufen mittlerweile gering ist und es sich zum überwiegenden Teil um Ersatzkäufe von Smartphones handelt. Eine Erhöhung der durchschnittlichen Nutzungsdauer hätte daher voraussichtlich eine direkte Reduktion der jährlichen Smartphone-Nachfrage und des damit verbundenen Rohstoffbedarfs zur Folge (Rizos et al. 2019). Die Frage, wie eine Erhöhung der Nutzungsdauer zu erreichen ist, beinhaltet dabei verschiedene Aspekte. Laut einer Eurobarometer Umfrage von 2020 (Europäische Kommission 2020)[1] gaben 38 Prozent der Befragten an, ihr letztes digitales Endgerät (Smartphones, Laptops, Tablets etc.) ersetzt zu haben, weil es nicht mehr funktionsfähig war. Für 30 Prozent war dagegen die Leistung des Geräts nichtmehr ausreichend und für 18 Prozent waren die gewünschten Anwendungen oder Applikationen für das Gerät nichtmehr verfügbar. Seltener dagegen wurden neue Features und Services (14 Prozent) bzw. der Wunsch, möglichst moderne Geräte zu besitzen (sechs Prozent) genannt. (Supple-Harrsi et al. 2021) schlagen daher vor allem Verbesserungen auf zwei Kerngebieten vor, um die Nutzungsdauer von Smartphones zu erhöhen: der Software-Support und die Reparierbarkeit.

Abhängig von Anbieter und Betriebssystem erhalten Smartphones nur für eine begrenzte Zeit Software-Updates. Diese sind allerdings notwendig für die Sicherheit des Geräts und das Funktionieren von einigen Applikationen und Services. Der durchschnittliche Software-Support durch Anbieter liegt aktuell bei nur zwei Jahren. Daher sollten Hersteller gesetzlich verpflichtet werden, Updates darüber hinaus bereitzustellen. (Supple-Harrsi et al. 2021) schlagen beispielsweise eine Garantie von sieben Jahren für Smartphones vor.

Digitale Endgeräte wie Smartphones sind komplexe Geräte, für deren Reparatur oft spezielles Wissen notwendig ist. Um die Reparierbarkeit von Smartphones zu erhöhen – sowohl für Drittanbietende als auch für Endnutzende – und damit die Nutzungsdauer zu verlängern, fordern (Supple-Harrsi et al. 2021) daher, dass benötigte Informationen, wie Handbücher und Baupläne öffentlich zugänglich gemacht werden. Dies könnte als Ergänzung zu dem von der Europäischen Kommission vorgebrachten Right-To-Repair (Europäische Kommission 2023d) z.B. in den Richtlinien zu Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte[2] ergänzt werden (Supple-Harrsi et al. 2021).

Maßnahmen zur Verbesserung der Reparierbarkeit und des Software-Supports sind grundsätzlich auch auf andere IKT-Geräte übertragbar und geeignete Optionen, hier eine Verlängerung der durchschnittlichen Nutzungsdauer und eine damit einhergehende Reduktion des jährlichen Rohstoffbedarfs zu erreichen. Allerdings unterscheidet sich die potenzielle Wirksamkeit der Maßnahmen zwischen Gerätetypen stark. So haben beispielsweise Laptops bereits eine deutlich höhere durchschnittliche Nutzungsdauer von ca. 4-5 Jahren (Woidasky und Cetinkaya 2021) und sind aufgrund ihrer Bauweise prinzipiell einfacher zu reparieren. Auch die Bereitstellung von Software und Sicherheitsupdates ist auf PCs und Laptops bereits deutlich höher.[3]

---

[1] Jede*r Befragte konnte bis zu drei Antwortmöglichkeiten wählen, Antwortmöglichkeiten addieren sich deshalb nicht auf 100 %.
[2] Englisch: Ecodesign for Sustainable Products Regulation – ESPR (Europäische Kommission 2023b).
[3] Der offizielle Support für Windows 10 durch Microsoft endet voraussichtlich nach ca. 10 Jahren im Oktober 2025 (Microsoft 2024)

Des Weiteren wurde der Beitrag des derzeitigen **Einsatzes von Sekundärmetallen** auf den Rohstoffkonsum betrachtet und dargestellt, welche Einsparungen an Primärrohstoffen durch eine weitere Erhöhung der Rezyklateinsätze möglich wären. Dazu wurde das Simulation-Modell von Schoer et al. (2023) als Grundlage genutzt, in welchem c.p. der Effekt einer Variation der Sekundärmetalleinsatzquote modelliert wurde. Für Kupfer werden etwa zwölf Mio. Tonnen RME durch den derzeitigen Sekundärmetalleinsatz eingespart, für Eisen liegt die Einsparung durch Recyclingaktivitäten bei etwa neun Mio. Tonnen und für Aluminium bei knapp 1,6 Mio. Tonnen (mit Rucksack). Die Ausnutzung von Potenzialen zur Erhöhung des Sekundärmetalleinsatzes würde weitere Verminderungen des Rohstoffkonsums bewirken. Eine ambitionierte Steigerung der Rezyklateinsatzquoten auf 75 Prozent für Eisen würde den Rohstoffkonsum (mit Rucksack) um ca. 1,1 Prozent vermindern, in der Materialgruppe Metallerze sogar um 6,5 Prozent. Etwa 11 Mio. Tonnen Metalle RME könnten im Vergleich mit den bisherigen Recyclingaktivitäten eingespart werden. Für Aluminium würde die Erhöhung der Aluminiumschrotteinsatzquote auf 67 Prozent der RMC um 0,1 Prozent vermindert werden, in der Materialgruppe Metallerze um 0,2 Prozent, das sind etwa 0,35 Mio. Tonnen RME weniger als im Status Quo. Bei Kupfer ließe eine Sekundäreinsatzquote von 59 Prozent den gesamten Rohstoffkonsum in Deutschland um 0,1 Prozent (0,8 Mio. Tonnen RME) sinken.

Die Simulationsergebnisse und die Größenordnung der Einsparung zeigen, dass die Erhöhung des Sekundärmetalleinsatzes ein wichtiger Stellhebel ist, um die Verwendung von Primärmetall zu senken. Eine solche Minderung schont nicht nur Ressourcen, sondern senkt auch die Importabhängigkeit Deutschlands bei Metallen. Essentiell zur Ausschöpfung dieses Potenzials ist die Verfügbarkeit von ausreichend Sekundärmetall in ausreichender Qualität und zu einem Preis, der einen Anreiz schafft Rezyklate den Primärrohstoffen vorzuziehen. Hierfür müssen politisch entsprechende Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Ein Startpunkt kann eine Zielvorgabe für den Einsatz von Sekundärmetallen über eine Recycling-Input-Rate (EoL-RIR) sein. Diese wird von der Europäischen Kommission bereits seit mehreren Jahren und für eine Vielzahl von Rohstoffen und Metallen gemonitort. (Europäische Kommission 2023c) Im Aktionsplan für Circular Economy setzte die EU sich das Ziel die *Circular Material Use Rate* (der Anteil des gesamten Recyclingmaterials an der Gesamtmenge des von der Wirtschaft verwendeten Materials) von derzeit 11,7 Prozent auf 23,4 Prozent bis 2030 zu verdoppelt. Der bislang sehr langsame Fortschritt und in Verbindung mit den Prognosen für eine steigende Materialnachfrage in der EU bis 2030 deuten darauf hin, dass die Zielerreichung unter den derzeitigen Rahmenbedingungen in weiter Ferne liegt. (EEA 2023) Zielvorgaben für einzelne Metalle gibt es zumal auf europäischer Ebene bislang nicht. Insgesamt zeigt sich, dass Sekundärmetalle noch eine geringe Rolle zur Deckung der Nachfrage spielen. Die Festlegung einer soliden Zielvorgabe für einzelne Metalle ist herausfordernd, weil der Beitrag den Sekundärmetalle zur Deckung des Bedarfs der verarbeitenden Industrie leisten können, zum einen stark von der Entwicklung der Nachfrage abhängt und darüber hinaus verschiedene Faktoren die Verfügbarkeit der Sekundärrohstoffe begrenzen. Darunter etwa die wirtschaftliche oder technische Machbarkeit, die Sammelquoten, die Lebensdauer der Produkte oder Verluste bei der Herstellung oder Verwendung. (Europäische Kommission o.J.) Um die Verfügbarkeit von Sekundärmetallen in ausreichender Qualität zu erhöhen, müssen unterschiedliche Handlungsstränge verfolgt werden. Am Beispiel von Kupfer lassen sich folglich einige davon aufzeigen, die von der DERA auch für Eisen und Aluminium und Technologiemetalle ausgearbeitet wurden (DERA 2023a). Beispielsweise wird die Sortierung und Aufbereitung von EoL-Schrotten insgesamt durch die steigende Komplexität von Produkten, deren Aufbau und Materialzusammensetzung (z.B. durch Miniaturisierung) erschwert; hier muss über Vorgaben zum Produktdesign bereits in der Designphase von Produkten an eine Zerlegbarkeit und Recyclingfähigkeit mitgedacht werden.

Dazu braucht es Vorgaben zum Design for Recycling. Über einen Produktpass würden zudem Recycler über die Materialzusammensetzung informiert. Designvorgaben, die ein Recycling nach der Nutzungsphase sicherstellen, sind für diverse Produktgruppen und Sektoren ein wichtiges Instrument, z.B. für die Verpackungsindustrie insbesondere für aluminiumenthaltende Verpackungen (Gürlich und Kladnik 2020; Kauertz und Schüler 2023).

Die Menge der tatsächlich gesammelten EoL-Produkte muss gesteigert werden. Bei der Sammlung beispielsweise von Elektro- und Elektronik-Altgeräten fehlen Anreize und deren Aufbereitung ist zu wenig am metallischen Rohstoffgehalt ausgerichtet. Es braucht daher politische Anreize zur Verbesserung der Sammlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. In Deutschland sind zudem die Verarbeitungskapazitäten von Kupferschrotten in der Sekundärmetallproduktion zu gering. Es braucht daher eine Erweiterung von Recyclingkapazitäten und -technologien in Deutschland (und Europa). Eine weitere Herausforderung ist, dass im Sortierprozess kontinuierlich Kupfer an den Stahlschrottstrom verloren gehen. Das bedeutet einerseits einen irreversiblen Kupfereintrag in den Stahlkreislauf und gleichermaßen eine relevante Verlustmenge für den Kupferkreislauf. Hier bedarf es einer Verminderung dieser Verluste, etwa durch eine verbesserte Sortierung der EoI-Schrotte (DERA 2023a). Für viele Sektoren (u.a. die Automobilindustrie) sind Legierungsbestandteile von größter Bedeutung. Hochleistungswerkstoffe wie Karosseriebleche oder Achsträger benötigen exakte Legierungsanteile. Eine Lösung hierfür sind neben vorab besseren Sortier- und Zerlegungsabläufen die Anwendung einer laserbasierten Sortier-Technik (LIBS) zur exakten Bestimmung der Legierung von Schrottteilen. Dadurch kann eine deutliche Steigerung der Menge der verwendeten Sekundärrohstoffe als Recyclingmaterial für die Produktion etwa von Hochleistungswerkstoffen erzielt werden. (Deutsche Bundesstiftung Umwelt 2023) Förderungen solcher Technologien sind hierfür essentiell.

Es könnte weiterhin über die Einführung eines Vorrangprinzips nachgedacht werden, sodass Primärrohstoffe nur dann eingesetzt werden, wenn tatsächlich keine Sekundärrohstoffe auf dem Markt (innerhalb des Sektors) verfügbar sind. Wichtig mitzudenken ist, dass es keine Verschiebungen/Verlagerungen zwischen Sektoren geben sollte, d.h. ein Sektor entzieht dem anderen Sekundärmaterial, sodass dieser den Bedarf durch Primärmetalle decken muss. (DERA 2023a)

Weiterhin in der Studie untersucht wurde, welche Recyclingpotenziale sich aus den „neuen“ Technologien ergeben. Aus den drei Anwendungen PV, Windturbinen und Energiespeicher stünden 2030 für Deutschland etwa 32 Kilotonnen Aluminium, 28,3 Kilotonnen Kupfer und 3,5 Kilotonnen Nickel zur Rückführung in einen erneuten Produktionsprozess zur Verfügung. Um dieses potenziellen Sekundärmetalle Metalle tatsächlich auszuschöpfen, bedarf es wie oben bereits angeführt eine Stärkung der Recyclingkapazitäten und insbesondere auch eine höhere Akzeptanz für Recyclingrohstoffe. Durch die Etablierung von Standards kann die Qualität von Recyclingrohstoffe auch für Basismetalle bzw. -legierungen verbessert werden.

Im Bereich **Verkehr** wurde vor dem Hintergrund stetig steigender Fahrzeugleergewichte betrachtet, welchen Effekt die Fokussierung auf das Segment der Kleinfahrzeuge bei Fahrzeugneuzulassungen hat. In unterschiedlich starken Ausprägungen wurden für die bis 2050 projizierten Neuzulassungen angenommen, dass ein Teil davon als Kleinfahrzeuge zugelassen wird anstelle als rohstoffintensivere mittel und große Fahrzeuge. Ebenfalls wurde als Stellhebel die absolute Verminderung der jährlichen Neuzulassungen und den Effekt verglichen mit dem Status quo berechnet. Schließlich wurde ebenfalls eine Kombination dieser beiden Stellhebel – ein steigender Anteil der Kleinfahrzeuge und insgesamt weniger Neuzulassungen – betrachtet.

Tabelle 9: Übersicht der Metalleinsparungen im Verkehr gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-9

	Variante	Eisen und Stahl	Aluminium	Kupfer	Nickel	Total
Rohstoff-bedarf	Status Quo	159.276	68.887	550.043	123.102	**901.307**
Einspa-rung ggü Status quo in va-riante…	Var_1	396	179	1.512	349	**2.436**
	Var_2	3.962	1.785	15.122	3.493	**24.364**
	Var_3	11.887	5.356	45.367	10.480	**73.091**
	Var_4	1.593	689	5.500	1.231	**9.013**
	Var_5	15.928	6.889	55.004	12.310	**90.131**
	Var_6	47.783	20.666	165.013	36.931	**270.392**
	Var_7	1.985	866	6.998	1.577	**11.425**
	Var_8	19.494	8.495	68.614	15.454	**112.058**
	Var_9	56.104	24.415	196.770	44.267	**321.556**

Eigene Darstellung ifeu auf der Basis von (KBA o.J.; Öko-Institut e.V. et al. 2023; Schoer et al. 2024)

Die Berechnungen der theoretischen Einsparungen gegenüber dem projizierten Status Quo zeigen, dass sowohl die Umverteilung der Fahrzeugsegmente hin zu kleineren Fahrzeugen aufgrund der geringeren Materialintensität deutliche Reduktionspotenziale birgt. Eine jährliche Verschiebung um 30 Prozent in das Kleinfahrzeugsegment (Var 3) spart im betrachteten Zeitraum (2025-2050) knapp 73 Mio. t RME Metalle ein. Noch drastischer, d.h. fast viermal mehr Einsparung (als Var 3), kann durch die Verminderung der Neuzulassungen um 30 Prozent der jährlich vorgesehenen Neuzulassungen erreicht werden; etwa 270 Mio. t RME weniger Metalle würden in dieser Variante (Var 6) gegenüber dem Status Quo verbaut werden. Die Kombination beider Stellhebel führt in den durchgeführten Varianten zum stärksten Effekt; knapp 322 Mio. t RME weniger Metalle würden in Var 9 gebraucht werden.

Wie lassen sich diese Potenziale realisieren? Die deutsche Politik könnte sich Frankreich als Vorbild nehmen. Frankreich hat ein sogenanntes Umwelt-Malus System implementiert und verschärft im Rahmen des französischen Haushaltsgesetzes 2024 die Kfz-Besteuerung erneut. Dieses System umfasst unter anderem eine Gewichtsstrafsteuer. Die Auslöseschwelle für die Gewichtsstrafsteuer wird ab 2024 von 1,8 auf 1,6 Tonnen (Leergewicht) gesenkt, der Strafsteuersatz steigt progressiv an. Für jedes Kilogramm das 1,6 Tonnen Fahrzeuggewicht übersteigt, fallen zehn Euro an. Ab einem Gewicht von 1,9 Tonnen beträgt der Strafsatz 20 Euro und ab 2,1 Tonnen wird jedes Kilogramm Mehrgewicht mit 30 Euro berechnet. (Assemblée national 2023; Baeumlin 2023)

Eine Verminderung der Neuzulassungen sollte gekoppelt werden an ausreichende Alternativen und demnach den Ausbau der öffentlichen Verkehrsmittel, eine Anpassung der Straßenverkehrsordnung zugunsten einer stärkeren Berücksichtigung von weniger ressourcenintensiven Verkehrsmitteln und die Schaffung finanzieller Anreize (wie durch das Deutschlandticket) diesen auch zu nutzen und dem Individualverkehr vorzuziehen. (Tauer und Aechtner 2023) Ebenfalls ist eine weitere Maßnahme die Förderung von Sharing-Konzepten. Vor dem Hintergrund der extrem geringen Auslastung der durchschnittlichen Fahrzeugflotte in Deutschland von nur einer Stunde Fahrzeit pro Tag (versus 23 Stunden Parkzeit) (Nobis und Kuhnimhof 2018) erscheinen Car-Sharing Modelle noch dringlicher.

Als weiterer Bereich wurde der **Wohnungsbau** betrachtet und abgeschätzt, wie hoch die Materialeinsparungen der vier Basismetalle sind, wenn die bereits in geringem Maße zu beobachtende Entwicklung sinkender Anteile der Neubauten an Einfamilienhäusern verstärkt wird, zugunsten des Neubaus von Mehrfamilienhäuser. Letztere haben je Wohneinheit einen geringeren Material und Metallbedarf. Ebenfalls wurde vor dem Hintergrund stagnierender Wohnzufriedenheitsniveaus trotz steigender durchschnittlicher Wohnfläche und dem Aspekt eines flächensparsamen Zubaus untersucht, welche Materialeinsparungen durch eine Verminderung der Pro-Kopf Wohnfläche von aktuell 47 m² auf 35 m² bei Neubauten erfolgen würde. Schließlich wurde auch die Kombination beider Varianten betrachtet. Alle Varianten wurden unter der Annahme gerechnet, dass das Wohnbauziel von 400.000 WE ab 2025 erreicht wird. Als zusätzliche Variante wurde ein deutlich verminderter Zubau an Neubauten von lediglich 70.000 WE betrachtet – bei Erfüllung des Wohnbauziels. Dies wird durch konsequente Umsetzung von diverser Suffizienzansätze weiterhin eingehalten. So werden in dieser Variante beispielsweise durch Leerstandsnutzung neue Wohneinheiten geschaffen, ebenfalls durch Aufstockungen, Büroumnutzungen und die Teilung von Einfamilienhäuser. Tabelle 10 zeigt die Einsparungen in der Übersicht.

Tabelle 10: Übersicht der Metalleinsparungen im Wohnungsbau gegenüber dem Status Quo in 1000 t RME im Zeitraum 2025-2050 der Varianten 1-3

	Variante	Total	Eisen/ Stahl	Aluminium	Kupfer
Rohstoff-bedarf	Status Quo	376.021	224.201	6.085	145.734
Einsparung ggü. Status Quo in…	Var 1	4.174	2.489	68	1.618
	Var 2	143.635	85.642	2.324	55.668
	Var 3	153.718	91.654	2.488	59.576

Eigene Berechnungen auf Basis von (Destatis 2023; Heinrich 2019; Schoer et al. 2024; Zimmermann et al. 2023)

Es zeigt sich, dass eine verstärkte Verschiebung des Neubaus hin zu einem höheren Anteil von Mehrfamilienhäusern anstelle von Einfamilienhäusern eine lohnende Maßnahme im Hinblick auf den Metallbedarf ist. Gegenüber dem Status Quo würden in dieser Variante (Var 1) ca. 4,2 Mio. t RME weniger Metalle benötigt. Noch materialschonender ist hingegen die Verminderung der durchschnittlichen Wohnfläche der Neubauten (Var 2); etwa 144 Mio. t RME weniger Metalle würden so verbaut und ebenfalls weniger Fläche benötigt werden, wohlgemerkt bei Erfüllung des Wohnbauziels. Eine Kombination der Varianten vermindert den kumulierten Rohstoffbedarf gegenüber dem Status Quo um 154 Mio. t RME.

Bei Verminderung des Zubaus auf 70.000 WE mit entsprechenden Maßnahmen zur Schaffung weiterer Wohneinheiten (durch Leerstandsnutzung, Umnutzung und Aufstockung, etc.) wird ein Bruchteil der Materialien des Status Quo benötigt. Der jährliche Metallbedarf liegt bei unter einem Drittel (31 Prozent) verglichen mit dem Metallbedarf im Status Quo. Die Bevorzugung der Bestands(aus)nutzung vor Neubau ist mit Hinblick auf den Materialbedarf daher – unter der betrachteten Varianten - der effektivste Stellhebel.

Realisieren lässt sich eine Verminderung des Zubaus nur, wenn bereits bestehende Wohn- und Nichtwohnungsflächen besser genutzt werden, sodass der tatsächliche Bedarf an Neubau sinkt. Grundsätzliche Prinzipien zur Ressourcenschonung im Gebäudebereich sind (u.a.)

die Priorisierung der Bestandsentwicklung vor Neubau, die Reduktion des Pro-Kopf-Flächenbedarfs, sowie die Möglichkeit zur Anpassbarkeit. Diese Ziele lassen sich durch eine Reihe von Ansätzen erreichen: Beispielsweise kann durch die Nutzung von aktuell und in Zukunft leerstehenden Büroflächen infolge des Trends hin zu mehr Home-Office neuer Wohnraum geschaffen werden. Weitere Alternativen (vor einem Neubau) sind Aufstockungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden, oder nur Teilerweiterungen durch einen Anbau. Zusätzlich sollte die Nutzung von Leerstand insbesondere im ländlichem Raum durch Förderungen attraktiver gemacht werden. (Tauer und Aechtner 2023; Zimmermann et al. 2023)

Auch eine Genehmigungspflicht für Abrisse, basierend auf eine Prüfung der Umwelt- und Klimafolgen sind ein wichtiges Instrument, um die Bestandserhaltung dem Neubau gegenüber zu priorisieren. (BauNetz 2023) Die Pro-Kopf-Wohnfläche kann z.B. durch einen Umzug in eine kleinere Wohnung, einen Wohnungstausch, die Aufnahme von weiteren Personen in den Haushalt oder die Abtrennung einer Wohneinheit und anschließende Untervermietung reduziert werden. Um Gebäude zukunftsfähig für sich verändernde Rahmenbedingungen bzw. Bedürfnisse zu machen, ist die Anpassungsfähigkeit von Gebäuden ein weiterer wichtiger Aspekt. Durch modulare Bauweisen kann (objektspezifisch) ein Umbauen vor neu Bauen besser realisiert werden. Hierfür braucht es Förderungen zur Skalierung solcher Konzepte. (Zimmermann et al. 2023)

Als konkretes Beispiel im Bereich Bauwesen wurde vertieft auf **Fensterkonstruktionen** eingegangen. Das Rechenbeispiel zeigt, eine Verlagerung der Nutzung von Fensterkonstruktionen mit einem hohen Anteil an Aluminium, zu Fenstertypen, in denen hauptsächlich andere Materialen verbaut sind, kann den Rohstoffbedarf an Basismetallen (mit Rucksack), bei gleichbleibendem Gesamtabsatz, um 39 bis 43 Prozent reduzieren. Dies entspricht ca. 275 bis 258 Kilotonnen RME Metallen. Es muss hierbei jedoch beachtet werden, dass Faktoren wie eine erhöhte Nachfrage nach alternativen Materialen (in diesem Fall vor allem Holz und Kunststoff), sowie mögliche Effekte auf den Preis und die Effizienz der Wärmedämmung, hier nicht betrachtet wurden. In Anbetracht des Ergebnisses empfehlen sich Politikmaßnahmen, die entweder angebots- oder nachfrageseitig auf eine Senkung der Produktionszahl von Aluminium-Fensterrahmen setzen. Vorstellbar wären hier etwa Anreize, wie Subventionen bzw. Kaufprämien, oder angepasste Bauvorschriften, die etwa den Anteil an Aluminium in einer Fensterkonstruktion vorgeben.

Tabelle 11: Übersicht der Metallbedarfe der 2022 in Deutschland verkauften Fenster in Tonnen RME und Varianten

	Varianten	Eisen und Stahl	Aluminium
Basismetalle enthalten in den in Deutschland verkauften Fenstern und Rahmen 2022	Status quo	191.838	261.777
Ersetzen des Fenstertyps "Aluminium"	Var 1	215.929	59.207
Ersetzen des Fenstertyps "Aluminium" und "Holz/Aluminium“	Var 2	244.779	12.946

Quelle: eigene Darstellung und Berechnung auf Basis von (Glaswelt 2023; Heinrich 2019; statista 2017)

Zudem gibt es auch im **Gesundheitssektor** eine Reihe von Ansatzpunkten für Reduktionspotenziale. Es konnten aufgrund der begrenzten Datenverfügbarkeit keine Abschätzungen zu quantitativem Einsparpotenzialen durchgeführt werden. Festzuhalten ist daher für den Bereich, dass Studien zur Abbildung der Material- und Stoffflüsse des Sektors wichtig sind, um wichtige Stellhebel mit Hinblick auf Material- und Rohstoffeinsparungen zu identifizieren. Im Gesundheitssektor werden hohe Anforderungen an Qualität und Hygiene der genutzten

Produkte gestellt, daher sind Maßnahmen, die beispielsweise die Substitution von Materialien vorsehen, immer vor diesen gesetzlichen Anforderungen zu prüfen. Der Trend des zunehmenden metallischen Einwegbestecks in OPs ist kritisch zu bewerten, weshalb Verbote hier ein Instrument sind, welches geprüft werden sollte. Bereits anlaufende Bemühungen und Pilotprojekte (wie z.B. am UKB und das Forschungsprojekt das Fraunhofer IKWS) zur werterhaltenden Wiederverwendung von metallischem Einweggebesteck sollten – vorausgesetzt keine Materialsubstitution oder Mehrwegalternative sind möglich – finanziell gefördert und skaliert werden. Krankenhäuser und Kliniken sind der fünftgrößte Abfallproduzierende Sektor in Deutschland. Daher müssen über den Bereich der Metalle hinaus weitere Optimierungsmöglichkeiten zur Senkung des Materialbedarfs und Abfallaufkommens stärker in den Fokus genommen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass anhand diverser Beispiele gezeigt wurde, dass es in Deutschland vielzähle Ansatzpunkte gibt, um den Einsatz der vier Basismetalle Eisen, Aluminium, Kupfer und Nickel deutlich zu senken. Stellhebel liegen

- In der Verlängerung der Nutzungsdauer von Gütern, beispielsweise bei elektronischen Geräten wie Smartphones oder weiteren IKT Geräten;
- In der Erhöhung des Sekundärmetalleinsatzes;
- in der Rückgewinnung der Sekundärmetalle aus neuen Technologien der Energiewende;
- In der Fokussierung des Neubaus von Mehrfamilienhäusern anstelle von Einfamilienhäusern vor dem Hintergrund des Wohnungsbauziels von 400.000 WE,
- sowie der Verminderung der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person vor dem Hintergrund eine stagnierender Wohnzufriedenheit ab ca. 41 m² pro Person und der Prämisse eines flächensparsamen Zubaus.;
- sowie in der Umsetzung von Suffizienzansätzen (wie Leerstandnutzung im ländlichen Raum, der Teilung von EFH, Büroumnutzungen und Aufstockungen) zur Verminderung des tatsächlichen Bedarfs an Neubauwohnungen (unter Einhaltung des Wohnungsbauziels),
- in der Prüfung, wo eine Materialsubstitution für ausgewählte Produktgruppen aus Rohstoffsicht sinnvoll ist, z.B. der Nutzungsverlagerung von Fensterkonstruktionen mit einem hohen Anteil an Aluminium;
- in der Verminderung des Individualverkehrs im Rahmen verminderter Neuzulassungen und einer Umverteilung der Neuzulassungen zugunsten des Kleinfahrzeugsegments,
- sowie in der Vermeidung des Downcycling von Metallen durch den Einsatz metallischem Einwegbesteck im Gesundheitssektor.

Eingangs wurde aufgezeigt, dass Deutschland den als nachhaltig geltende Rohstoffkonsum (7 t RME/Person) um mehr als das Doppelte überschreitet. Ein klares Bekenntnis zur Verminderung des absoluten deutschen Rohstoffkonsums im Rahmen eines Zielindikators wäre ein essentieller Schritt um sektorübergreifend Verminderungspotenziale wahrzunehmen und umzusetzen. Diese Studie zeigt insbesondere für die Bereiche Wohnen und Fahrzeuge mögliche Handlungspfade auf, die dazu einen Beitrag leisten können.

Literaturverzeichnis

abfallmanager-medizin.de (2019): Die jährlichen Abfallkosten pro Krankenhausbett belaufen sich auf 800 €. In: abfallmanager-medizin.de. https://www.abfallmanager-medizin.de/zahl-des-monats/die-jaehrlichen-abfallkosten-pro-krankenhausbett-belaufen-sich-auf-800-e/.

abfallmanager-medizin.de (2020): Einweg- oder Mehrwegprodukte im Klinikum nutzen? In: abfallmanager-medizin.de. https://www.abfallmanager-medizin.de/themen/op-besteck-einweg-oder-mehrwegprodukte-im-klinikum-nutzen/.

abfallmanager-medizin.de (2023): Metalle getrennt sammeln. In: abfallmanager-medizin.de. https://www.abfallmanager-medizin.de/abfall-abc/metalle-getrennt-sammeln/.

Aluminium Deutschland e. V. (2023): Aluminium in der Anwendung - alles über Alu. https://www.allesueberalu.de/aluminium-in-der-anwendung.html. (31.10.2023).

Assemblée national (2023): Projet de loi de finances n°1680 16e législature. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/16/textes/l16b1680_projet-loi#.

Baeumlin, C. (2023): Erneute Verschärfung der Kfz-Besteuerung in Frankreich. In: Frankreich für Unetrnehmen. https://www.ffu.eu/erneute-verschaerfung-der-kfz-besteuerung-in-frankreich/.

BauNetz (2023): Allianz gegen Abrisse Offener Brief im Vorfeld der Bauministerkonferenz. In: BauNetz. https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Offener_Brief_im_Vorfeld_der_Bauministerkonferenz_8433231.html.

BDSV (2018): Zukunft Stahlschrott. Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott. https://www.bdsv.org/fileadmin/user_upload/030-Bro-ZuSt-RZ-20.1.pdf.

BGR (2017): Nickel - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_ni.pdf;jsessionid=CBD76ACCFAF84779B2EC7391FD6F817E.internet992?__blob=publicationFile&v=3.

BGR (2021): Kupfer - Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer%202021.pdf;jsessionid=DBAC9483DF508C3E94CD81FF625290FF.internet961?__blob=publicationFile&v=3.

BGR (2022): Deutschland - Rohstoffsituation 2021. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohsit-2021.pdf;jsessionid=39E50731F2E9F2C81E4CA32B6CAB916F.internet992?__blob=publicationFile&v=4.

BGW (2023): Abfallentsorgung - Informationen zur sicheren Entsorgung von Abfällen im Gesundheitsdienst. Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW). https://www.bgw-online.de/resource/blob/18264/723ddf5d6d2f0f7a7f1c06a034835ce1/bgw09-19-000-abfallentsorgung-data.pdf.

BMWK (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMW. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

Charday, T. I.; Reckordt, M.; Schnittker, H. (2022): Metalle für die Energiewende - Warum wir die Rohstoffwende und die Energiewende zusammendenken sollten. PowerShift e. V., Berlin. https://power-shift.de/wp-content/uploads/2023/05/Metalle-fuer-die-Energiewende_web02_230523.pdf (15.02.2024).

Charday, T. I.; Reckordt, M.; Schnittker, H. (2023): Rohstoffwende und Energiewende zusammen denken – Kreislaufführung von Erneuerbaren Energien ausbauen. PowerShift e.V., Berlin. https://power-shift.de/wp-content/uploads/2023/05/PS_066_Studie_Kreislaufwirschaft_Web_230507.pdf (15.02.2024).

CRU International Ltd (2022): Opportunities for aluminium in a post-Covid economy - Prepared for the International Aluminium Institute. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2022/03/CRU-Opportunities-for-aluminium-in-a-post-Covid-economy-Report.pdf.

Dämmen und Sanieren (2023): Fensterrahmen - wichtiger Bestandteil jedes Fensters. https://www.daemmen-und-sanieren.de/fenster/material/fensterrahmen. (21.12.2023).

Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Kämper, C.; Auberger, A.; Priestr, M.; Rechlin, A.; Schöning, N.; Rüttinger, L.; Becker, F.; Scholl, C. (2020): Weiterentwicklung von Handlungsempfehlungen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II. UBA Texte 79/2020 Vorhaben des Umweltbundesamtes, FKZ 3715 32 310 0, Dessau-Roßlau.

Dehoust, G.; Manhart, A.; Möck, A.; Kießling, L.; Vogt, R.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Auberger, A.; Priester, Dr. M.; Rechlin, Dr. A.; Dolega, P. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I) Konzeptband. Umweltbundesamt.

Deloitte (2022): Digital Consumer Trends 2022 - Few smartphones are bought second-hand, but the market could pick up speed. https://www2.deloitte.com/dk/da/pages/technology-media-and-telecommunications/topics/digital-consumer-trends/few-smartphones-are-bought-second-hand-but-the-market-could-pick-up-speed.html (15.02.2024).

DERA (2023a): Abschlussbericht der Dialogplattform Recyclingrohstoffe. – DERA Rohstoffinfor- mationen 58: 243 S., Berlin. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-58.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

DERA (2023b): Status Quo des Recyclings bei der Metallerzeugung und -verarbeitung in Deutschland Recyclingatlas für die Metallerzeugung. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-57.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

DERA (o.J.): Rohstoff Eisen. Berlin. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/m-eisen.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

DERA (o.J.): Rohstoff Aluminium. Berlin. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/m-aluminium.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden. S. 51.

Destatis (2022a): Wohnungsbestand Ende 2021: 43,1 Millionen Wohnungen. In: Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/07/PD22_318_31231.html. (07.11.2023).

Destatis (2022b): Neue Rekordmenge an Haushaltsabfällen im Jahr 2021 - Pressemitteilung Nr. 546 vom 19. Dezember 2022. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22_546_321.html.

Destatis (2023): Bautätigkeit und Wohnungen Bautätigkeit Fachserie 5 Reihe 1. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/bautaetigkeit-2050100227004.pdf?__blob=publicationFile.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2023): Mit Schrott mehr Umweltschutz DBU fördert neue Technik – Erste kommerzielle Anlage startet. https://www.dbu.de/news/mit-schrott-mehr-umweltschutz/.

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K.; Fehrenbach, H.; Ewers, B.; Limberger, S. (2020a): 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. (2024): 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. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. UBA Climate Change 05/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_05-2020_endbericht_greensupreme.pdf (12.11.2020).

Dittrich, 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 - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_02-2020_endbericht_greenlate.pdf (12.11.2020).

Dittrich, M.; Liebich, A.; Ewers, B.; Biemann, K.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Wernet, G.; Brunner, F.; Müller, J.; Schoer, K. (2022): REFINE: Zwischenbericht zum AP 1 und AP 2 (unveröffentlicht). ifeu gGmbH, Fraunhofer ISI, EcoInvent, SSG.

Dorner, U. (2020a): Rohstoffrisikobewertung - Kupfer. DERA Rohstoffinformationen Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin.

Dorner, U. (2020b): DERA Rohstoffinformationen: Risikobewertung Kupfer. DERA Rohstoffinformationen 45, Berlin. S. 62.

Ducker Holding LLC (2023): Light Vehicle Aluminium Content and Outlook Study. https://drivealuminum.org/wp-content/uploads/2023/05/Ducker-ATG-2023-Summary-Report-April-2023.pdf.

EEA (2023): Circular material use rate in Europe. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/circular-material-use-rate-in-europe. (22.12.2023).

EEB (2019): Coolproducts dont't cost the Earth. Brussels. https://eeb.org/library/coolproducts-briefing/ (13.12.2023).

Erdle, F. (2019): Klimaschutzprogramm der Bundesregierung: Kannibalisiert das Klimaschutzpaket den Emissionshandel? WirtschaftsVereinigung Metalle. https://www.wvmetalle.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=120605&token=a02d8883e48ea0c53981e66c032a5da9a998a13b.

ETC-WMGE (2020): Electronic products and obsolescencei n a circular economy. European Environmental Agency, Boeretang. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/electronics-and-obsolescence-in-a-circular-economy (13.12.2023).

EuRIC (2020): Metal Recycling Factsheet. Brüssel. https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/euric_metal_recycling_factsheet.pdf.

Europäische Kommission (2020): Attitudes towards the impact of digitalisation on daily lives. Europäische Union. https://europa.eu/eurobarometer/surveys/detail/2228 (14.12.2023).

Europäische Kommission (2023a): Recht auf Reparatur: Reparaturen werden für Verbraucher/innen einfacher. In: European Commission - European Commission. Text, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_1794. (09.11.2023).

Europäische Kommission (2023b): Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Europäische Union, Brüssel. https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (14.12.2023).

Europäische Kommission (2023c): RMIS – Raw Materials Information System. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/.

Europäische Kommission (2023d): Right to repair: Commission introduces new consumer rights for easy and attractive repairs. Brüssel. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1794 (14.12.2023).

Europäische Kommission (o.J.): Raw materials scoreboard 2021. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/scoreboard2021#/ind/15.

European Commission (2023): Study on the critical raw materials for the EU 2023: final report. EC Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs., LU. https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585 (15.08.2023).

European Commission JRC (2020): Guidance for the assessment of material efficiency: application to smartphones. Publications Office, LU.

European Environment Agency (2021): Emerging waste streams: Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. https://www.eea.europa.eu/publications/emerging-waste-streams-opportunities-and.

Eurostat (2023): EW-MFA Database.

Fraunhofer UMSICHT (2016): Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott. Kurztitel: Zukunft Stahlschrott. https://www.bdsv.org/fileadmin/service/publikationen/Studie_Fraunhofer_Umsicht.pdf.

Gebäude Energieberater (2023): Fenstermarkt schrumpft 2023 weiter. https://www.gebinfo.de/fassade/fenstermarkt-schrumpft-2023-weiter. (20.12.2023).

Gilsbach, L.; Dorner, U. (2020): Kupfer - Informationen zur Nachhaltigkeit. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/kupfer.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Glaswelt (2023): Wirtschaftsprognose 2023: Fenstermarkt mit −4,5 % auf Talfahrt. https://www.glaswelt.de/service/wirtschaftsprognose-2023-fenstermarkt-mit-45-auf-talfahrt. (20.12.2023).

Graulich, K.; Bulach, W.; Betz, J.; Dolega, P.; Hermann, C.; Manhart, A.; Bilsen, V.; Bley, F.; Watkins, E.; Stainforth, T. (2021): Emerging waste streams – Challenges and opportunities. Öko-Institut e.V.; IDEA Consult; IEEP. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/EEA_emerging-waste-streams_final-report.pdf.

Grothman, T.; Frick, V.; Harnisch, R.; Münsch, M.; Kettner, S. E.; Thorin, C. (2023): Umweltbewusstsein in Deutschland 2022 - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. BMUV, UBA. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbewusstsein-in-deutschland-2022 (15.08.2023).

Gürlich, U.; Kladnik, V. (2020): Packaging Design for recycling - EINE EMPFEHLUNG DER ECR AUSTRIA ARBEITSGRUPPE „CIRCULAR PACKAGING DESIGN“. FH Campus Wien; Circular Analytics TK GmbH. https://www.ecr.digital/wp_contents/uploads/whitepapers/Packaging-Design-For-Recycling.pdf.

Harthan, R.; Förster, H.; Borkowski, K.; Bötther, H. (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. Umweltbundesamt.

Heinrich, M. A. (2019): Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau – Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham. Technische Universität München. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1453693/870797.pdf.

IEA (2020): Global end-use demand and in-use steel stock by scenario, 2000-2050. In: International Energy Agency. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-end-use-steel-demand-and-in-use-steel-stock-by-scenario-2000-2050.

IEA (2023a): World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc-4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf.

IEA (2023b): Critical Minerals Demand Dataset. In: IEA. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/critical-minerals-demand-dataset.

ifeu (2022): Ifeu Berechnungen auf Basis des EU RME Modells für Eurostat (unveröffentlicht).

ifeu (2023): Ifeu Berechnungen im Rahmen des DeuRess Modells (unveröffentlicht).

IIASA (2020): SSP Database (Shared Socioeconomic Pathways) - Version 2.0. In: International Institute for Applied Systems Analysis. https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=10.

IWKS (o.J.): HOCHWERTIGES RECYCLING MEDIZINISCHER EINWEGINSTRUMENTE. Fraunhofer-Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWK. https://www.iwks.fraunhofer.de/content/dam/iwks/de/documents/Flyer_Recycling%20und%20Wiederverwertung%20medizinischer%20Einmalger%C3%A4te_11_16.pdf.

JRC (2023a): Raw Material Profile - Copper. In: RMIS – Raw Materials Information System. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Copper.

JRC (2023b): Raw Material Profile - Eisen. In: RMIS – Raw Materials Information System. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Iron%20&%20Steel.

JRC (2023c): Raw Material Profile - Aluminium. In: RMIS – Raw Materials Information System. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Aluminium.

JRC (2023d): Raw Material Profile - Nickel. In: RMIS – Raw Materials Information System. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Nickel.

Kamali, M.; Hewage, K.; Sadiq, R. (2019): Conventional versus modular construction methods: A comparative cradle-to-gate LCA for residential buildings. In: Energy and Buildings. Vol. 204, S. 109479. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109479.

Kantar Worldpanel (2017): An Incredible Decade for the Smartphone: What's next? The Future of Mobile is in Combining Devices, Content and Services. https://www.kantarworldpanel.com/global/News/2017-smartphone-industry-insight-report (13.12.2023).

Kauertz, B.; Schüler, K. (2023): Der Beitrag kreislauffähiger Verpackungen zum Klimaneutralitätsziel 2045. GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, Mainz; ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Industrie_Produkte/der-beitrag-kreislauffaehiger-verpackungen-zum-klimaneutralitaetsziel-2045.pdf.

KBA (o.J.): Kraftfahrt-Bundesamt - Jahresbilanz. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/jahresbilanz_node.html;jsessionid=8454253CEEE4E5C2DEC96184A8E0F7D2.live11312?yearFilter=2017. (14.02.2024).

Knörr, W.; Heidt, C.; Gores, S.; Bergk, F. (2016): Aktualisierung „Daten- und Rechenmodell: Ener- gieverbrauch und Schadstoffemissionen des mo- torisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035“ (TREMOD) für die Emissionsberichterstattung 2016 (Berichtsperiode 1990-2014) - Anhang. https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/TREMOD5.6_ANHANG_160704.pdf.

LGBR (2021): Lithium. Landesamt fü r Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg. https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/printpdf/27560.

Liebig, S.; Goebel, J.; Grabka, M.; Schröder Carsten (2022): Sozio-oekonomisches Panel (SOEP), Daten der Jahre 1984-2020, (SOEP-Core, v37, EU Edition). Text, DIW Berlin. https://www.diw.de/en/diw_01.c.838578.en/edition/soep-core_v37eu__data_1984-2020__eu-edition.html. (09.02.2024).

Lutter, S.; Kreimel, J.; Giljum, S.; Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Schoer, K.; Manstein, C. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2022. Ressourcenbericht für Deutschland 2022 Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf.

Lutter, S.; Kreimel, J.; Giljum, S.; Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Schoer, K.; Manstein, C. (2023): Ressourcennutzung in Deutschland – Weiterentwicklung des deutschen Ressourcenberichts 2022 - Datengrundlagen. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcennutzung-in-deutschland-weiterentwicklung.

Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, 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: „Auftragsstudie“. DERA-Rohstoffinformationen Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin.

Martens, H. (2012): Aluminium-Recycling. https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-01-05316. (31.10.2023).

Microsoft (2024): Windows 10 Home and Pro. https://learn.microsoft.com/en-us/lifecycle/products/windows-10-home-and-pro. (15.02.2024).

Nickel Institute (2023): Nickel in batteries. https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/nickel-in-batteries/.

Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2018): Mobilität in Deutschland MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). infas; DLR und infas 360, Bonn, Berlin. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf (06.11.2023).

Noyan, O. (2023): Deutschland will sich in der Rohstoffpolitik neu ausrichten.

Öko-Institut e.V.; IREES; Thünen-Institut; Fraunhofer ISI (2023): Datenanhang mit Kernindikatoren zum Projektionsbericht 2023. In: Umweltbundesamt. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenanhang-kernindikatoren-projektionsbericht-2023. (14.02.2024).

Prakash, S.; Low, C.; Antony, F.; Dhoust, G.; Stuber-Rousselle, K.; Liu, R.; Gascón, L. (2023): Modell Deutschland Circular Economy - Modellierung und Folgenabschätzung einer Circular Economy in 9 Sektoren in Deutschland. Im Auftrag des WWF. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI, Freie Universität Berlin, Freiburg. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/MDCE_Modellierung.pdf (15.08.2023).

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2022): Bundesregierung will 400.000 neue Wohnungen pro Jahr bauen | Bundesregierung. In: Die Bundesregierung informiert | Startseite. //www.bundesregierung.de/breg-de/suche/wohnungsbau-bundesregierung-2006224. (09.02.2024).

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2023): Recht auf Reparatur kommt | Bundesregierung. In: Die Bundesregierung informiert | Startseite. https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/reparieren-statt-wegwerfen-2022782. (09.11.2023).

Purr, K.; Günther, J.; Lehmann, H.; Nuss, P. (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE Studie. Climate Change Umweltbundesamt (UBA), Dessau. S. 444. https://www.umweltbundesamt.de/rescue (13.10.2020).

Quaschning, V. (2024): Weltweit installierte Photovoltaikleistung. In: Volker Quaschning - Erneuerbare Energien und Klimaschutz. https://www.volker-quaschning.de/datserv/pv-welt/index.php. (15.02.2024).

Rahlf, T. (2015): Deutschland in Daten. Zeitreihen zur Historischen Statistik. Bundeszentrale für politische Bildung. http://hdl.handle.net/10419/124185.

Riahi, K.; van Vuuren, D. P.; Kriegler, E.; Edmonds, J.; O'Neill, B. C.; Fujimori, S.; Bauer, N.; Calvin, K.; Dellink, R.; Fricko, O.; Lutz, W.; Popp, A.; Cuaresma, J. C.; Kc, S.; Leimbach, M.; Jiang, L.; Kram, T.; Rao, S.; Emmerling, J.; Ebi, K.; Hasegawa, T.; Havlik, P.; Humpenöder, F.; Da Silva, L. A.; Smith, S.; Stehfest, E.; Bosetti, V.; Eom, J.; Gernaat, D.; Masui, T.; Rogelj, J.; Strefler, J.; Drouet, L.; Krey, V.; Luderer, G.; Harmsen, M.; Takahashi, K.; Baumstark, L.; Doelman, J. C.; Kainuma, M.; Klimont, Z.; Marangoni, G.; Lotze-Campen, H.; Obersteiner, M.; Tabeau, A.; Tavoni, M. (2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. In: Global Environmental Change. Vol. 42, S. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

Rizos, V.; Bryhn, J.; Alessi, M.; Campmas, A.; Zarra, A. (2019): Identifying the impact of the circular economy on the Fast-Moving Consumer Goods Industry - Opportunities and challenges for businesses, workers and consumers – mobile phones as an example. A study for

The European Economic and Social Committee (EESC). Centre for European Policy Studies (CEPS. https://www.eesc.europa.eu/sites/default/files/files/qe-03-19-510-en-n.pdf.

Schoer, K.; Dittrich, M.; Kovanda, J.; Weinzettel, J.; Ewers, B.; Limberger, S.; Moll, S.; Baptista, N.; Bouwmeester, M. (2024): 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.; Dittrich, M.; Limberger, S. (2023): Analyse der Auswirkungen ausgewählter Faktoren, die den Rohstoffkonsum beeinflussen. In Lutter at al. (2023).

SCRREEN (2023): FACTSHEETS UPDATES BASED ON THE EU FACTSHEETS 2020 NICKEL. https://scrreen.eu/wp-content/uploads/2023/03/SCRREEN2_factsheets_NICKEL.pdf.

Sokolow, A. (2020): Üblich in Kliniken und Praxen Millionen Edelstahlinstrumente landen im Müll. In: ntv wissen. https://www.n-tv.de/wissen/Millionen-Edelstahlinstrumente-landen-im-Muell-article21500844.html.

statista (2017): Produktion von Fenstern in Deutschland nach Rahmenmaterial im Jahr 2016.

statista (2023a): Anzahl der Pkw-Neuzulassungen in Deutschland von 1955 bis 2022 (in Millionen). In: Statista. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74433/umfrage/neuzulassungen-von-pkw-in-deutschland/. (06.11.2023).

statista (2023b): Sales volume of smartphones in Germany from 2009 to 2023 (in million devices).

statista (2024a): Global refurbished and used mobile phone market size from 2022 to 2033. https://www.statista.com/statistics/1309671/refurbished-smartphone-market-size-worldwide/ (15.02.2024).

statista (2024b): Smartphones - Worldwide. https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/telephony/smartphones/worldwide (15.02.204 n. Chr.).

Statista (2024): Wohnfläche je Einwohner in Wohnungen bis 2022. In: statista. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36495/umfrage/wohnflaeche-je-einwohner-in-deutschland-von-1989-bis-2004/. (09.02.2024).

Statistisches Bundesamt (2015): Bevölkerung Deutschland bis 2060. Destatis, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/Publikationen/Downloads-Vorausberechnung/bevoelkerung-deutschland-2060-presse-5124204159004.pdf?__blob=publicationFile.

Supple-Harrsi, L.; Bego, K.; Droemann, M. (2021): Breaking the Two-Year-Cycle. Extending the useful life of smartphones. NGI - Next Generation Internet. https://aankopen.vlaanderen-circulair.be/nl/publicaties/download-2/breaking-the-two-year-cycle-extending-the-useful-life-of-smartphones (14.12.2023).

Szurlies, M. (2021): Rohstoffrisikobewertung Nickel – Entwicklungen auf dem globalen Nickelmarkt. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/vortrag-nickel-szurlies.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Tauer, R.; Aechtner, J. (2023): Eine umfassende circular economy für Deutschland 2045 – Zum Schutz von Klima und Biodiversität. WWF Deutschland. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Broschuere.pdf (07.09.2023).

The Aluminium Association (2023): New Survey of Automakers Confirms Aluminum Use Expected to Grow in New Electric Vehicles. In: The Aluminum Association. https://www.aluminum.org/news/new-survey-automakers-confirms-aluminum-use-expected-grow-new-electric-vehicles. (19.12.2023).

UBA (2019): Aluminium. https://www.umweltbundesamt.de/aluminium-0#hinweise-zum-recycling.

UBA (2023): Verkehrsinfrastruktur und Fahrzeugbestand. In: Umweltbundesamt. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeugbestand. (09.02.2024).

UBA (o.J.): Best Practice Municipal Waste Management - Medizinische und Krankenhausabfälle. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/stoffstrom_medizin_med.pdf.

ukbnewsroom (2022): Recycling chirurgischer Einweggeräte. In: UKB Universitätsklinikum Bonn. https://www.ukbnewsroom.de/recycling-chirurgischer-einweggeraete/.

UNEP (2013): Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Unter Mitarbeit von Ester van der Voet, Reijo Salminen, Matthew Eckelman, Gavin Mudd, Terry Norgate und Roland Hischier. United Nations Environment Programme. https://www.resourcepanel.org/reports/environmental-risks-and-challenges-anthropogenic-metals-flows-and-cycles.

USGS (2020): Nickel. USGS. https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-nickel.pdf.

USGS (2023): Mineral Commodity Summaries 2023. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/mcs2023. (06.09.2023).

Vasters, J.; Franken, G. (2020): Aluminium - Infomrationen zur Nachhaltigkeit. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/aluminium.pdf?__blob=publicationFile&.

Vasters, J.; Franken, G.; Szurlies, M. (2021): Nickel - Infomrationen zur Nachhaltigkeit. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/nickel.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

Winnacker, K.; Küchler, L. (2006): Chemische Technik. Prozesse und Produkte. 5. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2020): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web1.pdf (27.10.2023).

Woidasky, J.; Cetinkaya, E. (2021): Use pattern relevance for laptop repair and product lifetime. In: Journal of Cleaner Production. Vol. 288, S. 125425. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125425.

WVMetalle (2021): Metallstatistik 2020. Gemeinsam Aufbrechen. https://www.wvmetalle.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=314715&token=ae6cf4b3bd20efc41f3d76bfb263e9af22798787.

Zimmermann, P.; Brischke, L.-A.; Bierwirth, A.; Buschka, M. (2023): Unterstützung von Suffizienzansätzen im Gebäudebereich. BBSR-Online-Publikation 09/2023. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2023/bbsr-online-09-2023-dl.pdf;jsessionid=1EF2B9DC1ED5DBE3222B07AB9043AA9D.live11313?__blob=publicationFile&v=2.