

Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft

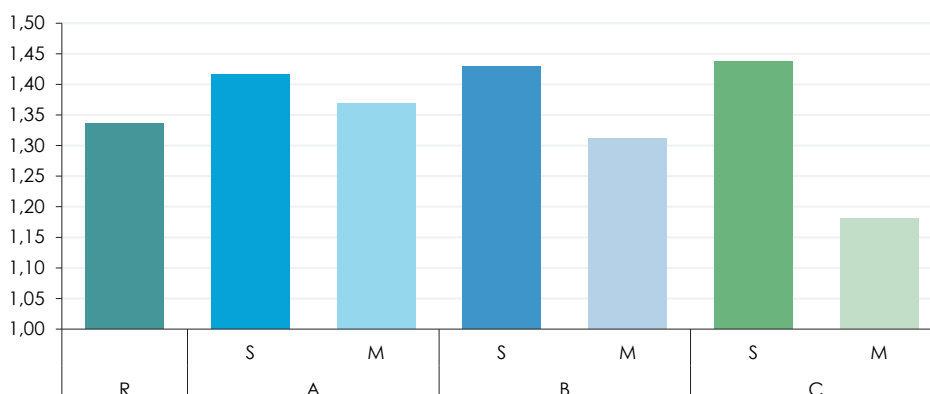
Ökonomische und biophysische Effekte verschiedener Szenarien für Österreich

Ina Meyer, Mark Sommer (WIFO), Kurt Kratena (CESAR), André Baumgart, Nina Eisenmenger, Willi Haas (BOKU)

- Zusätzlich zu einer vollständigen Dekarbonisierung bis 2040 wurden verschiedene starke Kreislaufwirtschaftsstrategien hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen und biophysischen Effekte modelliert.
- Angenommen wurde u. a. ein Umbau der Kapitalstöcke in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung, etwa durch ein reduziertes Bestandswachstum von Gebäuden und Straßen.
- Unter der Annahme einer unveränderten Sparquote wurden zwei unterschiedliche Rebound-Effekte berechnet, ein güterbezogener und ein dienstleistungsorientierter.
- Für die Modellierung wurde das biophysische Modell CeAT mit dem makroökonomischen Modell WIFO.DYNK verknüpft.
- Das starke Kreislaufwirtschaftsszenario kann die Ziele der Klimaneutralität und der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie erreichen. Die höchsten durchschnittlichen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte werden im Fall eines dienstleistungsorientierten Rebounds erzielt.

Auswirkung von Dekarbonisierung bzw. Kreislaufwirtschaft auf das Wirtschaftswachstum

Durchschnittliche Jahreswachstumsrate 2018/2040 in %



"Das verfügbare (Netto-)Einkommen ist ein wichtiger Indikator dafür, wie sich Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft auf die privaten Haushalte auswirken. In allen Szenarien außer in C.M nimmt das verfügbare Nettoeinkommen zu."

In den Szenarien mit dienstleistungsorientiertem Rebound-Effekt fallen die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten des BIP durchwegs höher aus als im Falle eines güterorientierten Rebound-Effektes (Q: WIFO-Berechnungen. R . . . Referenzszenario, A . . . Dekarbonisierungsszenario, B . . . Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft, C . . . Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft; Rebound-Effekte über S . . . Dienstleistungen, M . . . ressourcenintensive Güter).

Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft

Ökonomische und biophysische Effekte verschiedener Szenarien für Österreich

Ina Meyer, Mark Sommer (WIFO), Kurt Kratena (CESAR), André Baumgart, Nina Eisenmenger, Willi Haas (BOKU)

Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft. Ökonomische und biophysische Effekte verschiedener Szenarien für Österreich

Der vorliegende Beitrag analysiert anhand von Szenarien, inwieweit Strategien zur Dekarbonisierung kombiniert mit unterschiedlich ambitionierten Strategien zur Reduktion und Verlangsamung des Ressourcenverbrauchs es ermöglichen, die Ziele der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie zu erreichen. Unter Berücksichtigung zweier unterschiedlicher Rebound-Effekte – einer güterorientierten und einer dienstleistungsorientierten Verwendung der freigegebenen Finanzmittel – werden die wirtschaftlichen Effekte verschiedener Szenarien abgeschätzt. Der Fokus der Analyse liegt auf den Sektoren Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung. Es zeigt sich, dass nur das starke Kreislaufwirtschaftsszenario mit den Zielen zum Ressourcenverbrauch vereinbar ist. Wird dieses Szenario unter der Annahme einer konstanten Sparquote mit einem dienstleistungsorientierten Rebound-Effekt kombiniert, so ergeben sich auch die höchsten durchschnittlichen BIP-Wachstumsraten.

JEL-Codes: Q29, Q39, Q43, Q59 • **Keywords:** Kohlenstoffneutralität, Kreislaufwirtschaft, Szenarioanalyse, Analyse der wirtschaftlichen Auswirkungen, Rebound-Effekte, biophysische Effekte

Der vorliegende Beitrag beruht auf einer Studie von BOKU und WIFO im Auftrag des Klima- und Energiefonds, die im Rahmen des ACRP-Forschungsprojektes "KR19AC0K17512" erstellt wurde: Willi Haas, Ina Meyer, Doris Virág, Gerald Kalt, André Baumgart, Nina Eisenmenger, Mark Sommer, Kurt Kratena, Circular Economy and Decarbonisation: Synergies and Trade-offs. Endbericht (2024, mimeo).

Begutachtung: Angela Köppl (WIFO) • **Wissenschaftliche Assistenz:** Susanne Markytan (WIFO, susanne.markytan@wifo.ac.at) • Abgeschlossen am 7. 6. 2024

Kontakt: Ina Meyer (ina.meyer@wifo.ac.at), Mark Sommer (mark.sommer@wifo.ac.at), Kurt Kratena (kurt.kratena@cesarecon.at), André Baumgart (andre.baumgart@boku.ac.at), Nina Eisenmenger (nina.eisenmenger@boku.ac.at), Willi Haas (willi.haas@boku.ac.at)

Decarbonisation and Circular Economy. Economic and Biophysical Effects of Different Scenarios for Austria

This article uses scenarios to explore the extent to which decarbonisation strategies combined with different ambitious strategies for reducing and slowing down resource use, can achieve the goals of the Austrian circular economy strategy. Taking into account two different rebound effects, a goods-oriented and a service-oriented use of the freed-up financial resources, the possible economic impacts of different scenarios are examined. The analysis focuses on the building, transport, and electricity generation sectors. It is shown that only the strong circular economy scenario is compatible with the resource conservation targets. If this scenario is combined with a service-oriented rebound effect, assuming a constant savings rate, it also tends to result in the highest average GDP growth rates.

1. Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden verschiedene Szenarien zur Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft entworfen und ihre biophysischen und ökonomischen Effekte modelliert.

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy – CE), das den Übergang von einer linearen zu einer kreislaforientierten Wirtschaft anstrebt, hat in den letzten Jahren zunehmend an Interesse gewonnen. Es verspricht sowohl für die inländische Wirtschaft und den Arbeitsmarkt als auch für die Umwelt Vorteile, etwa in Form eines reduzierten Ressourcenverbrauches und einer Abkehr von fossilen Energieträgern (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Europäische Kommission,

2015). Kreislaufwirtschaft wird im vorliegenden Beitrag erstens als eine Reduktion des Ressourceneinsatzes (refuse, rethink, reduce), zweitens als eine Verlangsamung des Ressourcendurchsatzes (from reuse, repair to refurbish) und drittens als Schließung von Stoffkreisläufen (recycle, recover) verstanden (Morseletto, 2020; Potting et al., 2017).

Im Koalitionsvertrag steckte sich die Bundesregierung 2020 das Ziel, in Österreich bis 2040

Klimaneutralität¹⁾ zu erreichen. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022) zielt darauf ab, den inländischen Materialverbrauch (Domestic Material Consumption – DMC) von 17 t pro Kopf im Jahr 2022 (Statistik Austria, 2024a) bis 2030 auf 14 t und den Materialfußabdruck bis 2050 auf 7 t pro Kopf zu senken²⁾. Das diesem Beitrag zugrunde liegende Projekt "Circular Economy and Decarbonisation: Synergies and Trade-offs (CEDC)" untersuchte, wie die im Koditionsvertrag festgelegte Klimaneutralität sowie die Ziele der Kreislaufwirtschaftsstrategie im Zusammenspiel erreicht werden können. Hierfür wurden verschiedene Szenarien entwickelt, in einem kombinierten biophysisch-ökonomischen Modellansatz analysiert und unter Berücksichtigung von Rebound-Effekten die wirtschaftlichen Folgen abgeschätzt. Um eine qualitativ hochwertige biophysische Analyse zu erstellen, wurde auf ausgewählte Sektoren der österreichischen Volkswirtschaft fokussiert. Aufgrund ihrer Material- und Kohlenstoffintensität³⁾ sowie ihrer Verflechtungen wurden die Sektoren Gebäude, Verkehr (Personen- und Güterverkehr) und die Stromerzeugung ausgewählt.

Die modellierten Szenarien unterstellen eine Dekarbonisierung und zusätzlich unterschiedlich ambitionierte Strategien zur

2. Forschungsansatz und Methodik

Für die Impact-Analyse wurde ein streng massenbilanziertes biophysisches Modell (CeAT) mit einem makroökonomischen Modell der österreichischen Wirtschaft (WIFO.DYNK) gekoppelt. Mittels des makroökonomischen Modells wird simuliert, wie sich die aus dem biophysischen Modell resultierenden physischen Bestands- und Nachfrageveränderungen, die ihrerseits aus den Annahmen in den verschiedenen Szenarien folgen, auf die Beschäftigung, die Wertschöpfung und das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte auswirken.

In einem ersten Schritt wurde zunächst das zugrunde liegende biophysische Modell für das Jahr 2014 (Jacobi et al., 2018) in das neue Modell CeAT für das Jahr 2018 überführt und weiter ausgebaut (Näheres siehe Kasten "Das biophysische Kreislaufwirtschaftsmodell CeAT"). Für die Bereiche Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung, die 2018 in Summe 51% der Emissionen bzw. 49% des inländischen Materialverbrauchs (Domestic Material Consumption – DMC) in

Reduktion und Verlangsamung des Ressourcenverbrauchs sowie zur Schließung von Stoffkreisläufen. Diese Strategien bestehen in erster Linie in einem schrittweisen Umbau der gesellschaftlichen Kapitalstöcke, etwa durch die Sanierung von Gebäuden, den Heizungstausch, Änderungen im Fuhrpark, den Umbau der Verkehrsinfrastruktur und die Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energiequellen. Je nach den Annahmen zur Bestandsentwicklung verändern sich die Kapitalstöcke in den Sektoren Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung. Dadurch entfallen – im Vergleich zum Referenzszenario oder einem reinen Dekarbonisierungsszenario – bestimmte Investitions- und Produktionstätigkeiten, wodurch auch der Finanzbedarf für laufende Kosten und die Instandhaltung abnimmt. In den Kreislaufwirtschaftsszenarien können diese freigeordneten Mittel ceteris paribus für andere Produkte und Dienstleistungen verwendet oder gespart werden. Unter der Annahme einer gleich hohen Sparquote wie im Referenzszenario wurden die wirtschaftlichen Auswirkungen zweier unterschiedlich ausgeprägter makroökonomischer Rebound-Effekte untersucht. Die Analyse zeigt auf, welche Veränderungen in den Stoffströmen notwendig wären, um die Zielvorgaben der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie zu erreichen.

Österreich abdecken (Abbildung 1), wurden drei Sektormodule entwickelt. Die jährlichen biophysischen Materialflüsse bis 2040 wurden auf Basis der historischen Entwicklung der Materialintensitäten und des BIP modelliert.

Für diese Sektormodule wurden umfassende Datensätze erstellt, welche jeweils die relevanten Bestände bzw. Kapitalstöcke, die Materialausstattung (z. B. Gebäudetypen, Heizsysteme, Fahrzeuge, Straßen) und den Energiebedarf enthalten. Auf dieser empirischen Grundlage konnten Szenarien entwickelt werden, die verschiedene Dekarbonisierungs- und Kreislaufwirtschaftsstrategien widerspiegeln, wobei jede angenommene Konsum- oder Investitionsentscheidung den Bedarf an Material und Energieträgern und die damit verbundenen Emissionen verändert.

Die Ergebnisse dieser biophysischen Simulationen bilden die Grundlage der ökonomischen Impact-Analyse mit Hilfe des

Die Kreislaufwirtschaftsszenarien unterstellen den Umbau bestehender und die Entwicklung neuer Kapitalstöcke, etwa einen verringerten Bestandszuwachs an Gebäuden und Infrastruktur.

Für die Impact-Analyse wurde das massenbilanzierte biophysische Modell CeAT mit dem makroökonomischen Modell WIFO.DYNK gekoppelt.

Für die Sektoren Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung wurden umfassende Datensätze zu den Kapitalstöcken, deren Materialausstattung und Energiebedarf erstellt.

¹⁾ Klimaneutralität bedeutet, dass die Netto-Treibhausgasemissionen auf null reduziert werden. Die Nettoemissionen sind die Differenz zwischen den Treibhausgasemissionen, die in die Atmosphäre gelangen, und der Menge an Treibhausgasen, die ihr entzogen werden.

²⁾ Der Materialfußabdruck berechnet den gesamten, globalen Rohstoffaufwand entlang der internatio-

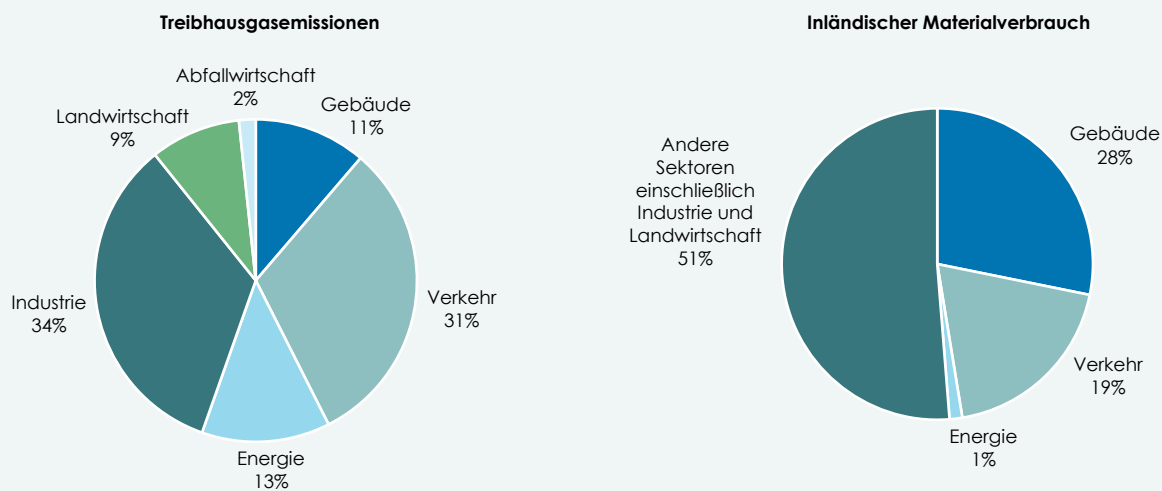
nen Lieferketten, der durch die heimische Endnachfrage (ohne Exporte) verursacht wird. Der Materialfußabdruck ist somit ein konsumbasierter Indikator.

³⁾ Die Kohlenstoffintensität eines Sektors bemisst sich an der Menge an CO₂, die er pro erzeugter Werteinheit emittiert.

WIFO.DYNK, die auch die makroökonomischen Rebound-Effekte und deren Auswirkungen auf Wertschöpfung und Beschäftigung berücksichtigt. Kreislaufwirtschaftskonzepte zielen auf die Verringerung des gesellschaftlichen Verbrauchs von Ressourcen bzw. Produkten ab, um die Umweltauswirkungen zu minimieren, können jedoch mit einem Rebound-Effekt einhergehen, wenn die

frei gewordenen finanziellen Mittel wiederum in den Konsum von unter Umständen materialintensiven Gütern und Dienstleistungen fließen. In der Literatur gelten Effizienzstrategien ohne weitere flankierende Maßnahmen daher als unzureichend, um die weltweiten Umweltkrisen zu bewältigen (Nørgaard & Xue, 2016).

Abbildung 1: **Anteile der Sektoren an den Treibhausgasemissionen und am inländischen Materialverbrauch** 2018



Q: Umweltbundesamt (2022), inländischer Materialverbrauch: BOKU-Modellierung (Institut für Soziale Ökologie).

In der Impact-Analyse wurden zwei alternative Rebound-Effekte modelliert, die eine Verwendung der Mittel für Güter oder alternativ für ressourcenarme Dienstleistungen, z. B. in den Bereichen Gesundheit oder Bildung, unterstellen. Hintergrund dieser Heran-

gehensweise ist die Frage, mit welcher Art von wirtschaftlichen Effekten zu rechnen ist, wenn ein struktureller Wandel von Wirtschaft und Gesellschaft zu einer ökologisch nachhaltigen Gesellschaft postuliert wird.

Das biophysische Kreislaufwirtschaftsmodell CeAT

Das in der Analyse verwendete biophysische Kreislaufwirtschaftsmodell CeAT wurde auf der Grundlage der gesamtwirtschaftlichen Materialflussrechnung (MFA) entwickelt (Krausmann et al., 2017; Haberl et al., 2019). Es verfolgt die Flüsse von Biomasse, Metallen, nicht-metallischen Mineralien und fossilen Energieträgern von der Gewinnung und Einfuhr in die heimische Wirtschaft bis hin zu ihrer Verarbeitung und Umwandlung in gesellschaftliche Kapitalstöcke, Exporte, Emissionen und Abfall-Outputs oder Recycling-Inputs. Das Modell wurde bereits erfolgreich auf die Weltwirtschaft, die EU 27, Österreich und Südafrika angewandt (Haas et al., 2015; Haas et al., 2020; Haas et al., 2023; Mayer et al., 2019; Jacobi et al., 2018). Details zu Konzept und Modell sowie den Annahmen hinter CeAT finden sich in der angeführten Literatur. Die Berechnungen in diesem Beitrag stützen sich auf das Modell für Österreich (Jacobi et al., 2018), das in mehrfacher Hinsicht erweitert wurde.

Als Referenzszenario wird eine Wirtschaftsentwicklung mit einem durchschnittlichen jährlichen BIP-Wachstum von rund 1,3% unterstellt.

2.1 Referenzszenario

Das Referenzszenario (R) dient als Bezugsgröße, um die Effekte verschiedener Dekarbonisierungs- und Kreislaufwirtschaftsszenarien zu quantifizieren. Es spiegelt allgemeine Entwicklungen wie das Bevölkerungswachstum, Veränderungen des BIP und anderer Variablen wider, die den Grundsätzen des WEM-Szenarios ("with existing measures", mit bestehenden Maßnahmen) des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2023a) entsprechen und Verschiebungen im Energie-

mix der Stromerzeugung oder Verbesserungen der Energieeffizienz bei Fortschreibung aktueller Trends berücksichtigen. In Anlehnung an das WEM-Szenario des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2021) wurde im Referenzszenario eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 1,33% unterstellt.

Um die Materialbestände und -flüsse bis 2040 zu simulieren, wurde eine Zeitdimension in das CeAT-Modell eingefügt. Dafür wurden die historischen Trends der Materialintensität

des BIP für die Jahre 2004/2018 getrennt für die inländische Gewinnung (Domestic Extraction – DE) sowie die Importe und Exporte dreier der vier Hauptmaterialkategorien (Biomasse, Metalle, Mineralien) berechnet. Basierend auf dem Wert des letzten verfügbaren Jahres (2018) und in Kombination mit dem BIP-Wachstum konnte so die Materialintensität der wichtigsten Materialgruppen bis 2040 fortgeschrieben werden.

2.2 Szenarien zu Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft

Um die Auswirkungen auf Wertschöpfung und Ressourcenverbrauch zu quantifizieren,

die sich aus der Umsetzung von ambitionierten Dekarbonisierungs- und Kreislaufwirtschaftsstrategien ergeben, wurden drei weitere Szenarien entwickelt: ein vollständiges Dekarbonisierungsszenario (A), sowie zwei Szenarien, die darauf aufsetzen und zusätzlich zur Dekarbonisierung schwache (B) bzw. starke Kreislaufwirtschaftsstrategien (C) unterstellen. Übersicht 1 fasst die Szenarien einschließlich der Ziele und Annahmen für die betrachteten Sektoren zusammen.

Für die Impact-Analyse wurden ein vollständiges Dekarbonisierungsszenario sowie darauf aufsetzend ein schwaches und ein starkes Kreislaufwirtschaftsszenario entwickelt.

Übersicht 1: Implementierte Dekarbonisierungs- und Kreislaufwirtschaftsziele für 2040

Sektor	Maßnahme	Szenario A Dekarbonisierung	Szenario B Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaftsstrategien	Szenario C Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaftsstrategien	Quellen
Gebäude	Dekarbonisierung der Heizsysteme	•	•	•	Kranzl et al. (2018)
	Verstärkte thermische Sanierung	•	•	•	Kranzl et al. (2018)
	Bessere Isolierung von Neubauten	•	•	•	Berechnung basierend auf OIB (2019)
	Reduktion der neuen Geschoßfläche pro Kopf um 25%		•		Eigene Annahmen
	Keine Verbauung auf unbebautem Land und um 25% verlängerte Lebensdauer von Gebäuden (Bau = 75% Abriss) Anteil Holzbau von 50%			• •	Eigene Annahmen Eigene Annahmen
Verkehr	Elektrifizierung der Fahrzeugflotte bis 2040	•	•	•	BMK (2022; Kreislaufwirtschaftsstrategie)
	Verlagerung der Verkehrsträgerwahl (Modal Split)	-10% motorisierter Individualverkehr (pkm) -10% Straßenverkehr (tkm)	-20% motorisierter Individualverkehr (pkm) -20% Straßenverkehr (tkm)	-50% motorisierter Individualverkehr (pkm) -40% Straßenverkehr (tkm)	A: eigene Annahmen; B: Mobilitätsmasterplan (BMK, 2021); C: eigene Annahmen
	Reduktion des Verkehrsaufkommens		-15% pkm -25% tkm	-30% pkm -50% tkm	C: BMVIT (2016); B: eigene Annahmen
	Verdoppelung beim Car-Sharing Kein Straßenausbau nach 2030			• •	Eigene Annahmen Eigene Annahmen
Stromerzeugung	Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe; Kapazität aus Wasserkraft in allen Szenarien konstant; Stromerzeugung aus Biomasse ("Bio to Power") sinkt in Szenarien B und C langsam ab 2018; Alle Szenarien berücksichtigen die Veränderung der Stromnachfrage für Gebäude und Verkehr.	Energiemix der inländischen Erzeugung: Windkraft 23% Photovoltaik 25% Laufwasserkraft 34% Speicherwasserkraft 11% Biomasse 5% Abfall 1% Geothermie 0% Inländische Erzeugung: 358 PJ	Energiemix der inländischen Erzeugung: Windkraft 21% Photovoltaik 24% Laufwasserkraft 37% Speicherwasserkraft 12% Biomasse 5% Abfall 1% Geothermie 0% Inländische Erzeugung: 335 PJ	Energiemix der inländischen Erzeugung: Windkraft 18% Photovoltaik 20% Laufwasserkraft 42% Speicherwasserkraft 14% Biomasse 4% Abfall 1% Geothermie 0% Inländische Erzeugung: 289 PJ	Annahmen abgeleitet von Österreichische Energieagentur (2017), Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (2019), Umweltbundesamt (2016, 2023b)

Q: BOKU- und WIFO-Annahmen sowie Annahmen aus der zitierten Literatur.

2.2.1 Szenario A: Dekarbonisierung

In Szenario A wurden die für eine vollständige Dekarbonisierung benötigten Veränderungen der Kapitalstöcke quantifiziert. Dazu

zählen z. B. thermisch sanierte Gebäude sowie CO₂-neutrale Heizungsanlagen, Fahrzeugflotten oder Kraftwerke. Die Dekarbonisierung von Heizungsanlagen wurde anhand von Kranzl et al. (2018) modelliert und das

Jahr der vollständigen Dekarbonisierung entsprechend der Regierungsvereinbarung (Bundeskanzleramt, 2020) von 2050 auf 2040 vorgezogen. Im Vergleich zum Referenzszenario wurde eine verstärkte thermische Sanierung des Gebäudebestandes angenommen; die jährliche Sanierungsrate beträgt 1,6% im Jahr 2025, 1,98% im Jahr 2030 und 1,3% im Jahr 2040 (Kranzl et al., 2018). In Anlehnung an die Entwicklung des Heizenergiebedarfs (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2007, 2019) wurden Veränderungs-raten für Dämmstoffdicken abgeleitet und auf die Dämmstoff-Faktoren für die Materialintensität angewandt, woraus sich im Durchschnitt eine Erhöhung der Dämmstoffdicke um 75% ergab. Die so festgelegten Annahmen wurden auch für die Szenarien B und C beibehalten.

Im Dekarbonisierungsszenario A ist die Fahrzeugflotte im Jahr 2040 vollständig elektrifiziert und die Stromerzeugung 2030 vollständig CO₂-neutral.

Für den Verkehrssektor wurde angenommen, dass die Fahrzeugflotte im Jahr 2040 vollständig elektrifiziert sein wird (BMK, 2021). Darüber hinaus wurden leichte Verschiebungen der Verkehrsträgerwahl (Modal Split) unterstellt: 10% der Personenkilometer verschieben sich von Kfz und Motorrädern zur öffentlichen und aktiven Mobilität (Rad- und Fußverkehr), 10% der Tonnenkilometer von der Straße auf die Schiene. Diese Annahmen basieren auf dem angestrebten Modal-Split-Anteil von 46% für die öffentliche und aktive Mobilität laut Mobilitätsmasterplan der Bundesregierung (BMK, 2021).

Die Stromerzeugung ist annahmegemäß bis 2030 vollständig dekarbonisiert. Dies spiegelt das ehrgeizige Ziel der österreichischen Bundesregierung wider, in diesem Sektor bereits zehn Jahre früher als laut EU-Vorgabe Klimaneutralität zu erreichen. Die Beiträge der einzelnen Stromerzeugungstechnologien zur Abdeckung des Endenergieverbrauchs⁴⁾ wurden verschiedenen Studien entnommen (Österreichische Energieagentur, 2017; Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2019; Umweltbundesamt 2016, 2023b). Abweichend von vorliegenden Ergebnissen und Zielen wurde die Stromerzeugung aus Wasserkraft (Laufwasser- und Speicherkraftwerke) auf dem Niveau von 2018 belassen. Für die übrige Stromerzeugung wurde die Aufteilung auf Photovoltaik und Windkraft aus den oben genannten Studien übernommen (Übersicht 1). Da der Endenergieverbrauch des Gebäude- und des Verkehrssektors in den Szenarien B und C sehr unterschiedlich ist, variiert die Aufteilung auf die Stromerzeugungstechnologien je nach Endenergieverbrauch und Szenario. Über den Ausstieg aus der Stromerzeugung mit fossilen Brennstoffen hinaus wurden keine weiteren Annahmen getroffen. Unterschiede im Elektrizitätssektor zwischen den Szenarien B und C sind daher auf die unterschiedliche Strom-

Szenario C unterstellt einen Baustopp auf bisher unbebauten Flächen und eine verstärkte Instandhaltung von bestehenden Gebäuden zur Verlängerung ihrer Lebensdauer.

⁴⁾ Die Stromerzeugung entfiel im Jahr 2019 wie folgt auf die verschiedenen Energieträger: Kohle 6%, Erdöl 2%, Erdgas 14%, Biomasse 8%, Abfälle 1%, Windkraft

nachfrage in den Sektoren Gebäude und Verkehr zurückzuführen.

2.2.2 Szenario B: Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaftsstrategien

Das Szenario B baut wie auch das Szenario C auf Szenario A auf und sieht zusätzlich zur vollständigen Dekarbonisierung moderate Kreislaufwirtschaftsstrategien vor. Für den Gebäudesektor wurde auf Basis der in Kranzl et al. (2018) beschriebenen Annahmen eine Reduktion der neu errichteten Wohngebäudefläche pro Kopf um 25% bis 2025 angenommen. Dies entspricht einer Verringerung der Nettogeschossfläche im Neubau um 19%. Im Modell wurde die Reduktion schrittweise ab 2018 umgesetzt und nach 2025 konstant gehalten.

Im Verkehrssektor wurde eine Verlagerung des Modal Split in Richtung des öffentlichen Verkehrs und der aktiven Mobilität im Ausmaß von 20% angenommen. Diese Anpassung liegt im Rahmen der diskutierten verkehrspolitischen Maßnahmen (Umweltbundesamt, 2023b). Zusätzlich postuliert wurde eine Verringerung des Verkehrsaufkommens um 15% (Personenkilometer) bzw. 25% (Tonnenkilometer; vgl. z. B. Umweltbundesamt, 2023b).

2.2.3 Szenario C: Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaftsstrategien

Das starke Kreislaufwirtschaftsszenario spiegelt Ziele wider, die über das hinausgehen, was derzeit ratifiziert oder von öffentlichen Institutionen geplant ist. So wurde angenommen, dass auf bisher unbebauten, "grünen" Flächen nicht mehr gebaut wird, sondern nur mehr Flächen verbaut werden dürfen, auf denen zuvor ein Gebäude abgerissen wurde. Weiters wurde unterstellt, dass die Instandhaltung von Gebäuden verstärkt wird, wodurch die Lebensdauer der Gebäude steigt und Abrisse um 25% abnehmen. Annahmegemäß wird in 50% der Neubauten Holz als Ersatz für Zement und Stahl verwendet, wodurch sich die Materialintensität und die Materialzusammensetzung des Bestandszuwachses verändern.

Die Annahmen für den Verkehrssektor beinhalten eine 50-prozentige Verlagerung vom Individualverkehr zum öffentlichen Verkehr und zur aktiven Mobilität sowie eine 40-prozentige Verlagerung des Güterverkehrsaufkommens von der Straße auf die Schiene. Dies impliziert, dass der Ausbau des Straßennetzes mit 2030 endet, die Attraktivität der Pkw- und Lkw-Nutzung sinkt und jene des öffentlichen (Bahn-)Verkehrs steigt. Annahmegemäß steigen die Preise für Mobilität, wodurch sich die individuellen Mobilitätsent-

9%, Photovoltaik 2%, Laufwasserkraft 42%, Speicherkraft 14%, Nettoimporte 16% (Statistik Austria, 2024b).

scheidungen verändern. Die angenommene Verringerung des Verkehrsaufkommens (Personenkilometer) um 30% gegenüber dem Referenzszenario unterstellt einen Stopp von Zersiedelung und Neuverbauung. Für den Güterverkehr wurde eine Verringerung um 50% gegenüber dem Referenzszenario angenommen, wobei berücksichtigt wurde, dass bei verringerter Bauaktivität und einem Ausstieg aus fossilen Brennstoffen deutlich weniger Material transportiert werden muss.

Darüber hinaus wurden in Szenario C eine zunehmende Nutzung von Home-Office, eine Verdoppelung des Carsharing bis 2040 und eine weiter voranschreitende Urbanisierung postuliert, die die Anzahl und Länge der Wege verringert (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2016).

2.3 Der makroökonomische Modellierungsansatz

Das biophysische Modell CeAT wurde über zwei Kanäle mit dem makroökonomischen Modell WIFO.DYNK⁵⁾ verbunden. Einerseits flossen die BIP-Projektionen des Referenzszenarios in CeAT ein. Andererseits flossen Daten zu biophysischen Strömen und Beständen (z. B. Anzahl neu errichteter Gebäude, zusätzliche Fahrzeugflotte), die in einem eigenen Aufbereitungsschritt monetarisiert wurden, in das WIFO.DYNK ein. Die monetären Veränderungen wurden im WIFO.DYNK als exogene Inputs behandelt und bestimmen dort die Ausgaben und Investitionen für die betreffenden Güter, die sonst endogen bestimmt werden.

Für die vorliegende Analyse wurde das ursprüngliche WIFO.DYNK erweitert und mehrfach modifiziert:

- **Sektorenerweiterung:** Das WIFO.DYNK basiert auf den offiziellen österreichischen Aufkommens- und Verwendungstabellen und enthält Verflechtungen von 74 Branchen (nach ÖNACE und CPA 2008). Für die vorliegende Analyse wurde die Anzahl der Sektoren und Rohstoffe von 74 auf 90 erweitert. Zudem wurde die zum Zeitpunkt des Projektbeginns neueste Input-Output-Tabelle für 2018 herangezogen. Ein sektoraler Schwerpunkt lag auf der Gewinnung von Energierohstoffen und Transportdienstleistungen. Dies ermöglichte eine präzisere Verknüpfung mit den CeAT-Outputs, z. B. dem Verbrauch von Kohle für die Wärmeerzeugung oder straßengebundenen Transportdienstleistungen.
- **Verbrauchsmodul (Konsum):** In den Bereichen Verkehr (Fahrzeugbestand) und Wohnen (Gebäude- und Heizungsbestand), in denen der Energiebedarf von der Nutzung und der Energieeffizienz der

Kapitalstöcke abhängt, ist ein Stock-Flow-Ansatz in das WIFO.DYNK integriert. Für die Analysen wurde das Modell dahingehend modifiziert, dass diese endogen bestimmbar Variablen exogen gesetzt werden können. Dadurch können die Ergebnisse des CeAT als Input in das WIFO.DYNK eingefügt werden, nachdem sie mit Kosten und Preisen pro physischer Einheit in Geldwerte umgewandelt wurden (Übersicht 2). So wird z. B. der Bau neuer Wohneinheiten durch Multiplikation mit den durchschnittlichen Kosten je m² im Jahr 2018 bewertet. Die Kosten ändern sich im Laufe der Zeit mit der Inflation.

- **Verfügbares Einkommen:** Im WIFO.DYNK-Modell umfasst der Konsum der privaten Haushalte drei Hauptblöcke: Gebrauchsgüter (Wohnung, Fahrzeuge, Heizungen), Energieträger (Kohle, Erdöl, Erdgas, Biomasse, Strom und Fernwärme) und Verbrauchsgüter wie z. B. Lebensmittel und Gesundheitsdienstleistungen. Der Verbrauch von Gebrauchsgütern und Energie wird hier durch die Ergebnisse des CeAT-Modells bestimmt. Der Konsum an Verbrauchsgütern hängt im ursprünglichen WIFO.DYNK-Modell wesentlich vom verfügbaren Bruttoeinkommen ab. Hierzu wurden zwei Modifikationen vorgenommen: Erstens eine zusätzliche Berechnung des verfügbaren Nettoeinkommens, das Abschreibungen auf Wohnungen ausschließt. Zweitens wurde unterstellt, dass das verfügbare Nettoeinkommen anstatt des Bruttoeinkommens den Verbrauchsgüterkonsum antreibt. Dies ist insofern zentral, als die Szenarien eine Situation simulieren, in der der private Kapitalstock stark abnimmt; dadurch steigt das verfügbare Nettoeinkommen, das für andere Güter und Dienstleistungen ausgegeben werden kann (Rebound-Effekt), während das Bruttoeinkommen wegen der geringeren Abschreibung sogar sinken kann.
- **Stromerzeugung:** Das WIFO.DYNK-Modell wurde in einem früheren Projekt (START2030)⁶⁾ um ein Stromerzeugungsmodul erweitert, das die öffentliche Elektrizitätsversorgung (ÖNACE 2008, Gruppe D35.1) detaillierter modelliert und in 11 Teilspektoren disaggregiert, die zehn Erzeugungstechnologien sowie Handel und Vertrieb repräsentieren. Die jährliche Zusammensetzung der Technologien wird exogen festgelegt. In der vorliegenden Analyse ist der Entwicklungspfad jeder Technologie an die Veränderung des in CeAT modellierten physischen Kraftwerkskapazitätsmixes gekoppelt. Zusätzliche Investitionen in Kraftwerke und Netze werden monetarisiert und in das Modell integriert (Übersicht 2).

Für die Berechnung der Rebound-Effekte wurde das Konzept des verfügbaren Einkommens verwendet, das Abschreibungen auf Wohnungen ausschließt.

⁵⁾ Eine detaillierte Beschreibung des Modells findet sich in Kirchner et al. (2019).

⁶⁾ <https://start2030.wifo.ac.at/>.

Übersicht 2: Inputdaten für die makroökonomische Modellierung

	2018	2020	2025	2030	2035	2040
	Mio. €					
Gebäude						
Miete (private Haushalte)						
Referenzszenario	29.910	30.869	33.587	36.786	40.516	44.845
Dekarbonisierungsszenario	29.910	30.869	33.587	36.786	40.516	44.845
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	29.910	30.767	32.849	35.151	37.910	41.180
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	29.910	30.869	32.635	32.432	31.465	30.525
Investitionen in Wohngebäude (private Haushalte und gewerblicher Wohnbau)						
Referenzszenario	24.308	25.848	29.765	33.461	37.569	42.242
Dekarbonisierungsszenario	24.308	25.848	29.765	33.461	37.569	42.242
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	24.308	24.273	25.148	28.233	31.667	35.572
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	24.308	25.848	19.268	8.590	8.377	7.755
Reparatur und Instandhaltung von Wohngebäude (private Haushalte)						
Referenzszenario	7.518	7.759	8.440	9.241	10.174	11.257
Dekarbonisierungsszenario	7.518	7.759	8.440	9.241	10.174	11.257
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	7.518	7.733	8.254	8.830	9.520	10.337
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	7.518	7.759	8.201	8.147	7.900	7.660
Zusätzliche thermische Sanierung (private Haushalte)						
Referenzszenario	0	0	0	0	0	0
Dekarbonisierungsszenario	0	366	1.080	2.037	1.420	1.004
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	0	366	1.080	2.037	1.420	1.004
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	0	366	1.080	2.037	1.420	1.004
Verkehr						
Fahrzeugkauf (private Haushalte)						
Referenzszenario	6.644	6.092	9.987	9.598	11.036	12.918
Dekarbonisierungsszenario	6.644	7.694	7.506	8.219	9.007	14.297
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	6.644	5.796	5.429	5.945	6.515	10.357
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	6.644	1.673	918	1.005	1.101	1.796
Fahrzeugenergie (private Haushalte)						
Referenzszenario	6.061	6.401	7.291	8.320	9.489	10.871
Dekarbonisierungsszenario	6.061	6.186	6.297	6.219	5.840	2.888
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	6.061	6.221	6.197	5.909	5.296	2.099
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	6.061	6.302	6.092	5.523	4.631	766
Fahrzeuginstandhaltung (private Haushalte)						
Referenzszenario	7.386	7.679	8.549	9.686	10.857	12.219
Dekarbonisierungsszenario	7.386	7.701	8.283	8.942	9.690	10.539
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	7.386	7.594	7.603	7.620	7.639	7.658
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	7.386	7.362	6.127	4.746	3.182	1.397
Öffentlicher Verkehr (private Haushalte)						
Referenzszenario	4.817	5.027	5.734	6.556	7.482	8.585
Dekarbonisierungsszenario	4.817	5.035	5.931	7.056	8.358	9.929
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	4.817	4.913	5.176	5.471	5.803	6.177
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	4.817	5.062	6.492	8.281	10.136	12.090
Fossiler Treibstoff für heimischen Güter- und Busverkehr (Dienstleistungssektoren)						
Referenzszenario	0	0	0	0	0	0
Dekarbonisierungsszenario	0	- 31	- 193	- 363	- 537	- 710
Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft	0	- 22	- 139	- 275	- 439	- 643
Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft	0	- 13	- 83	- 166	- 292	- 624

Q: Input-Output-Tabelle 2018, zu laufenden Preisen, WIFO-Berechnungen.

- **Konstante Sparquote der privaten Haushalte:** Die Dekarbonisierungs- und Kreislaufwirtschaftsszenarien unterstellen eine deutliche Verringerung der Ausgaben für Wohnungen und Fahrzeuge. Die so freigewordenen Mittel fließen annahmegemäß in den Konsum anderer Güter oder Dienstleistungen (Rebound-Effekt). Zur Modellierung wurde im Vergleich zu

jedem Jahr im Referenzszenario eine konstante Sparquote unterstellt. Die "freien" Mittel, die z.B. durch geringere Aufwendungen für Wohnkredite und weniger Autoreparaturen entstehen, können für vordefinierte Güterbündel ausgegeben werden, einerseits für ressourcenintensive Güter⁷⁾ und andererseits für Dienstleistungen⁸⁾.

Unter der Annahme einer konstanten Sparquote fließen die Minderausgaben für Kapitalstöße entweder in Güter oder in Dienstleistungen und erzeugen so Rebound-Effekte.

3. Modellergebnisse

3.1 Ökonomische Impact-Analyse

Die Resultate des CeAT-Modells zeigen für jedes Szenario die Veränderung der physischen Flüsse im Vergleich zum Referenzszenario. Diese Materialflüsse wurden wie beschrieben mittels Preisannahmen monetarisiert. Die Abweichungen der Ausgaben vom Referenzverlauf wurden für die ökonomische Analyse in Veränderungen der Güternachfrage übertragen und exogen in die Ausgabenstruktur der privaten Haushalte und der betroffenen Sektoren (z. B. öffentlicher Verkehr oder Bauwesen) im Modell WIFO.DNYK eingespeist.

Die Veränderungen der Güternachfrage umfassen Mehrausgaben (z. B. für die Gebäudesanierung oder den Kauf von Elektrofahrzeugen) und Minderausgaben (z. B. für Treibstoffe und Neubauten). In Summe sinken in jedem Szenario die exogen vorgegebenen Ausgaben der privaten Haushalte gemäß den CeAT-Ergebnissen (Übersicht 2).

In jedem Wirtschaftsmodell führt eine solche Ausgabenkürzung zu einem Anstieg der Sparquote und zu einem Rückgang der inländischen Produktion und der Wertschöpfung. Für die vorliegende Analyse wurde in allen Szenarien angenommen, dass die Sparquote der privaten Haushalte in jedem Jahr gleich hoch ist wie im Referenzszenario. Für die Verwendung der eingesparten Ausgaben wurden zwei mögliche Varianten definiert. In den "M"-Varianten der Szenarien werden die frei gewordenen Geldmittel nur für Güter ausgegeben, in den "S"-Varianten nur für Dienstleistungen. Während Güter eher material- und importintensiv sind, sind Dienstleistungen eher beschäftigungsintensiv und erhöhen die inländische Wertschöpfung. Die beiden Umschichtungsvarianten M und S ergeben in Kombination mit den drei Hauptszenarien A, B und C sechs Szenarien. Abbildung 2 zeigt die durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten 2018/2040 in Bezug auf das BIP, das verfügbare Nettoeinkommen und die Beschäftigung.

Im Referenzszenario wächst das BIP um etwa 1,33% pro Jahr. Das Szenario A unterstellt eine vollständige Dekarbonisierung; Heizung, Stromerzeugung und Mobilität werden von fossilen auf alternative, erneuerbare Energietechnologien umgestellt. Der isolierte Rückgang der Nachfrage nach Brennstoffen dämpft das BIP-Wachstum lediglich um 0,01 Prozentpunkte, da in Szenario A importierte fossile Brennstoffe durch inländische Quellen (wie z. B. Umgebungswärme) ersetzt werden. Die Betriebskosten sind niedriger und die eingesparten Mittel können anderweitig ausgegeben werden, bis die Sparquote derjenigen im Referenzszenario entspricht. Daraus folgt in beiden Varianten (A.M Ausgaben für Waren und A.S Ausgaben für Dienstleistungen) eine positive Auswirkung auf das BIP-Wachstum. Der BIP-Effekt ist in A.S größer, weil Dienstleistungen eine relativ geringe Importintensität und eine hohe Lohnintensität im Inland aufweisen. Dadurch fließt ein höherer Anteil der durch eingesparte Investitionen freigesetzten Mittel in die inländische Wertschöpfung.

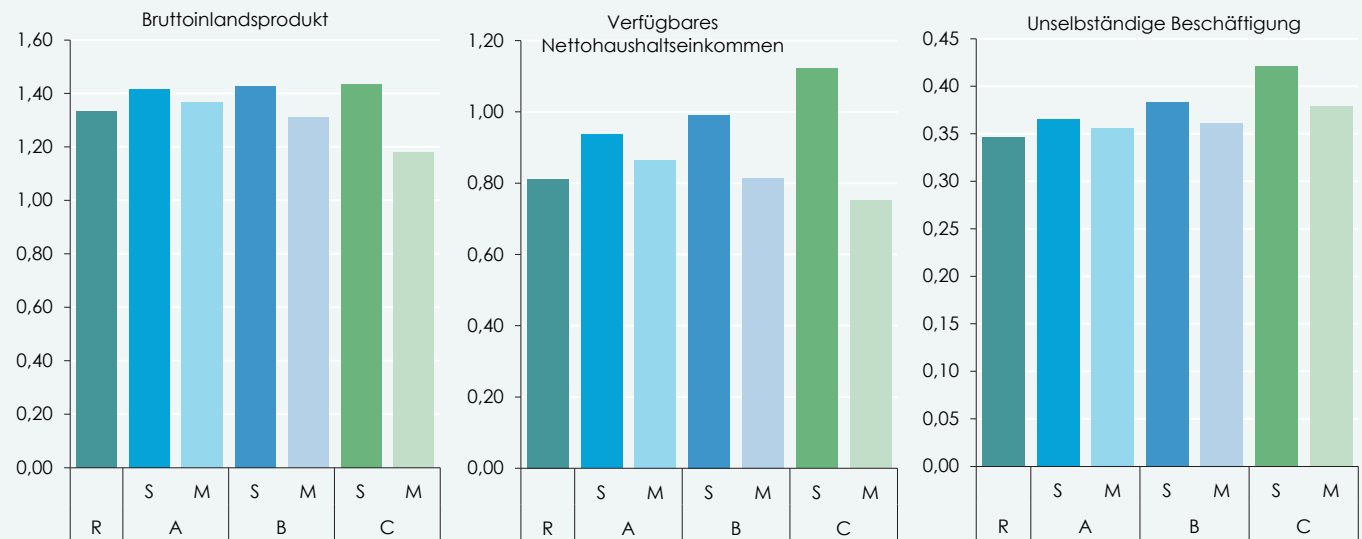
Die Szenarien B und C setzen auf Szenario A auf und treffen zusätzliche Annahmen zur Kreislaufwirtschaft. Im Fokus des Szenarios B stehen ein Rückgang der Ausgaben und Investitionen für Wohnen und private Mobilität. Ohne Rebound-Effekte würde das BIP-Wachstum um 0,14 Prozentpunkte sinken und läge bei 1,20% pro Jahr. Die positiven Auswirkungen der Mehrausgaben sind jedoch nur geringfügig höher als im Szenario A, da dort hauptsächlich die Nachfrage nach importierten fossilen Brennstoffen durch Ausgaben für Waren oder Dienstleistungen ersetzt wird, was sich deutlich positiv auf das BIP auswirkt. Die in Szenario B zusätzlich ersetzten Ausgaben und Investitionen für Wohnen und Mobilität weisen hingegen selbst keine hohe Importquote auf. Durch die Verlagerung der Nachfrage entsteht daher ein eher neutraler (S) bzw. ein negativer zusätzlicher BIP-Effekt, wenn die Ausgaben zu Waren (M) verlagert werden, deren Vorleistungskette importlastiger ist als jene der Bereiche Wohnen und Mobilität.

⁷⁾ Kategorien CPA 01 bis 33, ausgenommen Kraftfahrzeuge (CPA 29) und Energierohstoffe (CPA 05, 06, 19, 35), da diese bereits durch die Inputs von CeAT bestimmt werden.

⁸⁾ Kategorien CPA 41 bis 99, ausgenommen Bauleistungen (CPA 41 bis 43) und Mieten (CPA 68), da diese bereits durch die Inputs von CeAT bestimmt werden.

Abbildung 2: Entwicklung des BIP, des verfügbaren Haushaltseinkommens und der Beschäftigung im Referenzszenario und in den Modellszenarien A, B und C

Durchschnittliche Jahreswachstumsrate 2018/2040 in %



Q: WIFO-Berechnungen. R . . . Referenzszenario, A . . . Dekarbonisierungsszenario, B . . . Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft, C . . . Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft; Rebound-Effekte über S . . . Dienstleistungen, M . . . ressourcenintensive Güter.

Im Szenario C.S ergibt sich aufgrund der hohen Arbeits- und der niedrigen Importintensität der zusätzlich nachgefragten Dienstleistungen die höchste BIP-Wachstumsrate.

Im Szenario C werden die Veränderungen des Szenarios B verstärkt, strukturell ergeben sich aber sehr ähnliche Effekte. Der isolierte Nachfragerückgang im Szenario C würde das BIP-Wachstum auf unter 1% p. a. dämpfen. Durch den Einsatz der freigesetzten Mittel beschleunigt sich das Wachstum jedoch wieder auf durchschnittlich 1,44% pro Jahr (C.S) bzw. auf 1,18% pro Jahr (C.M).

Die Beschäftigungseffekte sind in allen Szenarien positiv und im Szenario C.S, das einen Dienstleistungs-Rebound unterstellt, am höchsten.

Das verfügbare (Netto-)Einkommen (Abbildung 2, mittlere Grafik) ist ein wichtiger Indikator dafür, wie die privaten Haushalte von den Szenarien A, B und C betroffen sind. Eine zentrale Triebkraft des verfügbaren Bruttoeinkommens⁹⁾ ist die Entwicklung der Löhne und Gehälter, die Teil des BIP sind. Der Fokus liegt hier jedoch auf dem verfügbaren Nettoeinkommen. Es entspricht dem verfügbaren Bruttoeinkommen abzüglich des Teiles, der für die Erhaltung des Wohnungsbestandes erforderlich ist. Wenn der zu erhaltende Wohnungsbestand kleiner wird, steht ein größerer Teil des Einkommens für andere Konsumzwecke zur Verfügung.

Neben dem BIP wird auch das verfügbare Nettoeinkommen durch einen Rückgang des Wohnungsbestandes positiv beeinflusst. Daher entsprechen die Veränderungen der Wachstumsraten des verfügbaren Nettoeinkommens strukturell den BIP-Effekten, enthalten aber einen zusätzlichen positiven Impuls durch die Mittel, die vormalig in den Erhalt

von Wohnungen geflossen waren. In allen Fällen außer im Szenario C.M nimmt das verfügbare Nettoeinkommen zu.

Die Auswirkungen auf die Beschäftigung sind in allen Szenarien positiv (Abbildung 2, rechte Grafik). Aufgeschlüsselt nach Sektoren scheinen drei Bereiche besonders von den Neuausgaben für materialintensive Güter (Szenario M) zu profitieren, wodurch auch die Arbeitsnachfrage steigt. Der erste Bereich ist die Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln, der zweite Sektor sind Handelsdienstleistungen (Einzel- und Großhandel) und der dritte Bereich ist der Transport. Der Grund dafür liegt in der Struktur¹⁰⁾ der Wiederverwendung der frei gewordenen Mittel. In den Basisjahren beinhaltet der Güterkonsum der privaten Haushalte große Anteile an landwirtschaftlichen Produkten und Lebensmitteln. Beide sind arbeitsintensiv. Außerdem ist der Verbrauch dieser Güter mit Transport und Handel verknüpft.

In den Szenarien B.M und C.M werden die Ausgaben, die vormalig in das Bauwesen und die Fahrzeugbranche flossen, durch Ausgaben für materialintensive Verbrauchsgüter ersetzt. Die dafür benötigten Ressourcen und Vorleistungsgüter weisen entlang ihrer Wertschöpfungskette einen höheren Importanteil auf und dämpfen dadurch das BIP-Wachstum (Abbildung 2, linke Grafik). Allerdings ist für diese Güter die Arbeitsinten-

⁹⁾ Siehe die Komponenten des verfügbaren Einkommens in den Konten des nichtfinanziellen Sektors: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nasa_10_nf_tr.

¹⁰⁾ Die Ausgabenstruktur entspricht den Ausgaben für Güter (CPA 01 bis 33) im privaten Konsumvektor in der Input-Output-Tabelle 2018, mit Ausnahme der Energierohstoffe (CPA 05, 06, 19) und der Fahrzeuge (CPA 29).

sität innerhalb der Wertschöpfungskette höher als im Bauwesen und der Fahrzeugbranche. Daher ist der Beschäftigungseffekt der Neuverwendung insgesamt positiv. Die Lohnsätze in den Sektoren Landwirtschaft, Lebensmittelverarbeitung, Handel und Transport sind eher niedrig. Daher ist das verfügbare Einkommen in C.M niedriger als in R, während die Beschäftigung höher ist.

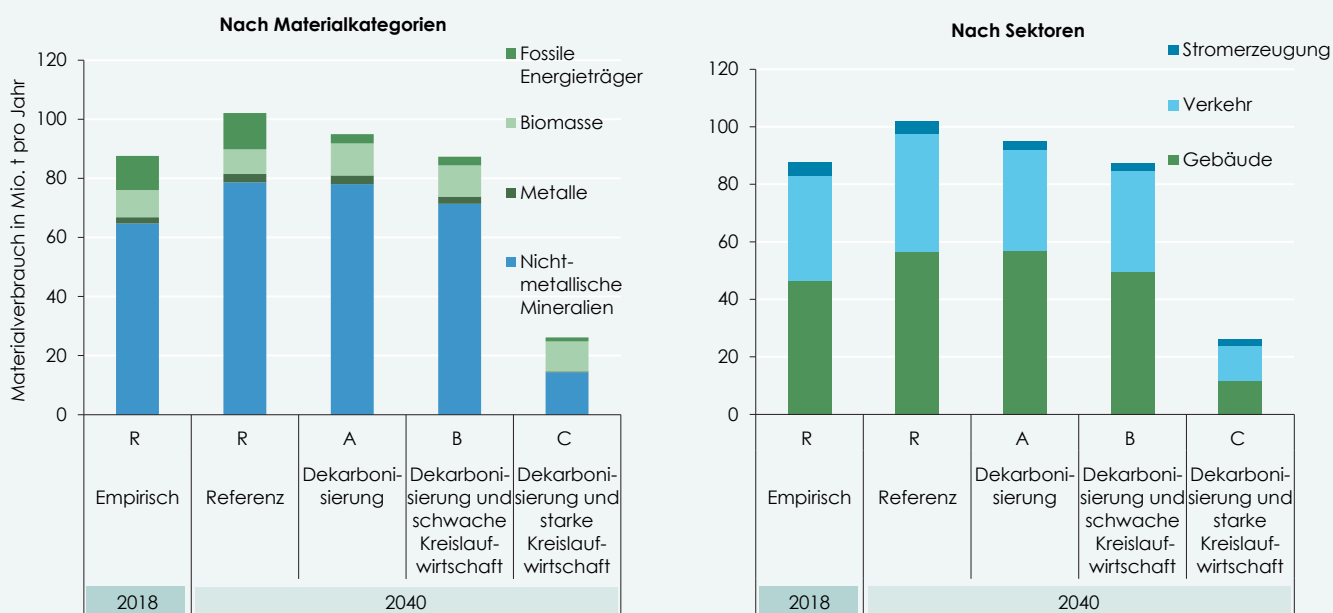
Die vorliegende ökonomische Impact-Analyse unterstellt für die Szenarien R, A, B und C keine unterschiedlichen Energie- und CO₂-Preise, da die Ergebnisse der biophysischen Modellierung implizit Preisannahmen und Marktreaktionen enthalten. Die Einbindung von Energie- und CO₂-Preispfaden in das makroökonomische Modell hätte Auswirkungen auf die Energienachfrage der privaten Haushalte und den Energiemix, die jedoch bereits im biophysischen Modell erfasst und als exogene Variable in das makroökonomische Modell übernommen wurden. Zwar könnte argumentiert werden, dass steigende Preise für Energie und CO₂-Zertifikate die Energiekosten für die Haushalte erhöhen, allerdings würde der Einfluss der Verteuerung von CO₂ durch die Dekarbonisierung bis 2040 ohnehin abnehmen. Zudem dürfte Österreich zu klein sein, um die weltweiten

Energie- oder Ressourcenpreise zu beeinflussen. Daher wurde von möglichen Preiseffekten abgesehen und nur auf die makroökonomischen Effekte abgestellt. Wegen der begrenzten Projektlaufzeit und der Einschränkungen des ökonomischen Modells wurden weiterführende ökonomische Effekte, z. B. Auswirkungen auf die Mietpreise, nicht berücksichtigt.

3.2 Ergebnisse der biophysischen Modellierung

Im Referenzszenario steigt der Materialverbrauch der drei Sektoren Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung von 88 Mio. t im Jahr 2018 auf 102 Mio. t im Jahr 2040 (Abbildung 3). Dies resultiert in erster Linie aus der Fortführung der Bauaktivitäten und dem steigenden Konsum durch das kontinuierliche Wirtschaftswachstum und unter Berücksichtigung der zunehmenden Steigerung der Materialeffizienz. Im Dekarbonisierungsszenario A ist der Materialverbrauch im Jahr 2040 – vor allem wegen des Wegfalls der fossilen Energieträger – um fast 10% niedriger als im Referenzszenario, obwohl der Materialaufwand für Sanierungen und den Austausch von Heizungen, Fahrzeugen und Kraftwerken zunimmt.

Abbildung 3: Materialverbrauch (einschließlich Sekundärrohstoffe)



Q: BOKU-Modellierung (Institut für Soziale Ökologie). R . . . Referenzszenario, A . . . Dekarbonisierungsszenario, B . . . Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft, C . . . Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft.

Das schwache Kreislaufwirtschaftsszenario B ergibt gegenüber R eine Reduktion des Materialverbrauchs von etwa 15% im Jahr 2040, wobei der stärkste Rückgang auf die Verkleinerung des Pro-Kopf-Wohnraums im Neubau um 25% zurückzuführen ist. Im starken Kreis-

laufwirtschaftsszenario C ist eine Einsparung des Materialverbrauchs um über 70% erreichbar. Diese deutliche Verringerung geht in erster Linie darauf zurück, dass der Neubau von Straßen und Gebäuden auf unbebautem Land schrittweise ausläuft. Auch die

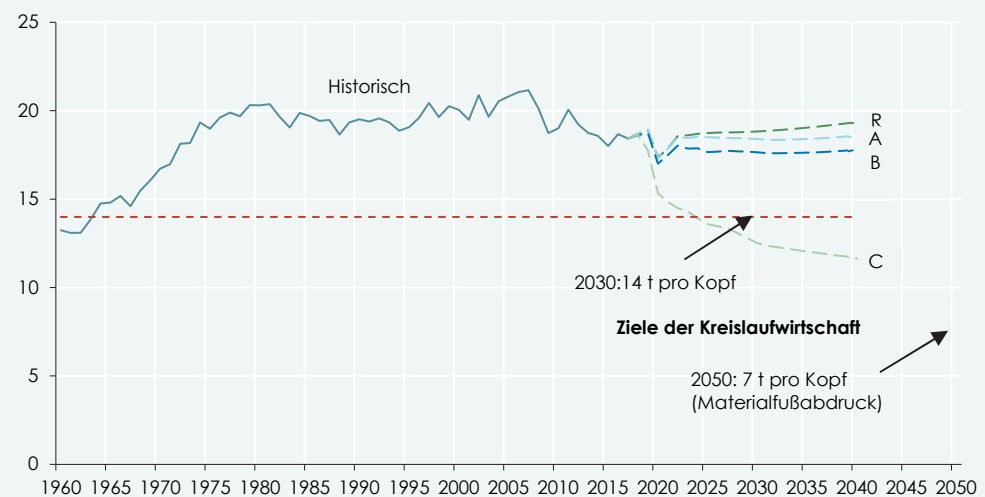
Die Ziele der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie werden nur im starken Kreislaufwirtschaftsszenario C annähernd erreicht.

Verlängerung der Lebensdauer von Gebäuden spielt eine Rolle. Nur dieses starke Kreislaufwirtschaftsszenario C ist mit den Zielen der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie vereinbar. Dies wird deutlich, wenn die Szenarien als Fortsetzung einer langen Zeitreihe des gesamten inländischen Materialverbrauchs dargestellt werden (Abbildung 4).

Im Jahr 2018 emittierten die Sektoren Gebäude, Verkehr und Stromerzeugung 8,9 Mio. t an Kohlenstoff, wobei damit nur die Emissionen laut den nationalen Treib-

hausgasinventaren erfasst sind. Bei anhaltenden Trends (Referenzszenario) würden die Emissionen auf 9,6 Mio. t Kohlenstoff im Jahr 2040 bzw. kumuliert bis 2040 auf 211 Mio. t steigen, wodurch die drei Sektoren ihr Kohlenstoffbudget für 2050 (rund 130 Mio. t Kohlenstoff; Zielwert für alle Sektoren: 1.000 Mio. t CO₂-Äquivalente; Kirchengast et al., 2019) bereits 2040 um mehr als 60% überschreiten würden. In allen anderen Szenarien wird dieses Budget eingehalten, insbesondere im Szenario C, wo mit kumulierten 97 Mio. t Kohlenstoff nur 74% des Budgets genutzt würden.

Abbildung 4: Inländischer Materialverbrauch (1960/2018) und Szenarien bis 2040



Q: Historisch: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (2015), Statistik Austria (2023), Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2022). BOKU-Modellierung (Institut für Soziale Ökologie). R . . . Referenzszenario, A . . . Dekarbonisierungsszenario, B . . . Szenario Dekarbonisierung und schwache Kreislaufwirtschaft, C . . . Szenario Dekarbonisierung und starke Kreislaufwirtschaft starke Kreislaufwirtschaft.

4. Schlussfolgerungen

Wie die Modellergebnisse zeigen, kann ein starkes Kreislaufwirtschaftsszenario die Ziele der Klimaneutralität und der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie erreichen und dabei Wertschöpfung und Beschäftigung generieren.

Das Projekt "Circular Economy and Decarbonisation: Synergies and Trade-offs (CEDC)", auf dem dieser Beitrag basiert, lieferte wichtige Erkenntnisse für die Bewertung des zukünftigen Kreislaufwirtschaftspotenzials der österreichischen Wirtschaft. Darüber hinaus konnten die biophysischen und makroökonomischen Auswirkungen verschiedener nachhaltiger Transformationsstrategien, die von der Dekarbonisierung bis hin zu einer weitreichenden Kreislaufwirtschaft reichen, im Detail analysiert werden.

Wie die Ergebnisse zeigen, lassen sich in einem starken Kreislaufwirtschaftsszenario prinzipiell Emissionsneutralität, die Ziele der Kreislaufwirtschaft sowie wichtige Zusatznutzen (co-benefits) wie eine Reduktion des Flächenverbrauchs erreichen. Obwohl ambiti-

oniertere Kreislaufwirtschaftsstrategien eine große Herausforderung für die politischen Entscheidungsträger darstellen, sind die Einschränkungen für die Verbraucher:innen moderat. Vielmehr erzeugt die Kreislaufwirtschaft nicht zuletzt in Bezug auf Beschäftigung und das Wirtschaftswachstum einen wertvollen Nutzen und erhöht damit die Wohlfahrt, sofern die frei gewordenen Finanzmittel nicht gespart, sondern ausgegeben werden (Annahme konstanter Sparquote). In den Modellsimulationen erwies sich insbesondere eine Dekarbonisierung in Kombination mit einem starken Kreislaufwirtschaftsszenario (C) als vorteilhaft in Bezug auf Wertschöpfung und Beschäftigung, sofern die freigesetzten Mittel in den Konsum von Dienstleistungen fließen.

5. Literaturhinweise

- Brenner, A.-K., Haas, W., Krüger, T., Matej, S., Haberl, H., Schug, F., Wiedenhofer, D., Behnisch, M., Jaeger, J. A. G., & Pichler, M. (2024). What drives densification and sprawl in cities? A spatially explicit assessment for Vienna, between 1984 and 2018. *Land Use Policy*, 138, 107037. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.107037>.
- Bundeskanzleramt Österreich (2020). *Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024*.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie – BMK (2021). *Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich*.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie – BMK (2022). *Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft – BML, BMWF (2015). *Ressourcennutzung in Österreich. Bericht 2015*.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus – BMNT (2019). *Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich. Periode 2021-2030*. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/at_final_necp_main_de_0.pdf.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie – BMVIT (2016). *Österreich unterwegs 2013/2014. Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätserhebung "Österreich unterwegs 2013/2014"*.
- Ellen MacArthur Foundation (2013). *Towards the circular economy Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition*.
- Europäische Kommission (2015). *Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*. COM(2015) 614 final.
- Formayer, H., Jandl, R., Bohner, A., Eitzinger, J., Erb, K.-H., Haas, W., Matthews, B., Meyer, I., Spiegel, H., Tappeiner, U., Tasser, E., & Voigt, A. (2024). Kapitel 1. Ziele, Herangehensweise und Kontext. In Jandl, R., Tappeiner, U., Foldal, C. B., Erb, K. (Hrsg.), *APCC Special Report: Landnutzung und Klimawandel in Österreich* (S. 30-56). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-67864-0_3.
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 765-777. <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>.
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., & Mayer, A. (2020). Spaceship earth's odyssey to a circular economy – a century long perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 163, 105076. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105076>.
- Haas, W., Virág, D., Wiedenhofer, D., & Von Blottnitz, H. (2023). How Circular is an Extractive Economy? South Africa's Export Orientation Results in Low Circularity and Insufficient Societal Stocks for Service-Provisioning. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4386062>.
- Haberl, H., Wiedenhofer, D., Pauliuk, S., Krausmann, F., Müller, D. B., & Fischer-Kowalski, M. (2019). Contributions of sociometabolic research to sustainability science. *Nature Sustainability*, 2, 173-184. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0225-2>.
- Jacobi, N., Haas, W., Wiedenhofer, D., & Mayer, A. (2018). Providing an economy-wide monitoring framework for the circular economy in Austria: Status quo and challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 137, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.022>.
- Kirchengast, G., Kromp-Kolb, H., Steininger, K., Stagl, S., Kirchner, M., Ambach, C., Grohs, J., Gutsohn, A., Peisker, J., & Strunk, B. (2019). *Referenzplan als Grundlage für einen wissenschaftlich fundierten und mit den Pariser Klimazielen in Einklang stehenden Nationalen Energie- und Klimaplan für Österreich (Ref-NEKP)*. Climate Change Centre Austria. <https://epub.oeaw.ac.at/?arp=0x003b2d00>.
- Kirchner, M., Sommer, M., Kratena, K., Kletzan-Slamanig, D., & Kettner-Marx, C. (2019). CO₂ taxes, equity and the double dividend – Macroeconomic model simulations for Austria. *Energy Policy*, 126, 295-314. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518307535>.
- Kranzl, L., Müller, A., Maia, I., Büchele, R., & Hartner, M. (2018). *Wärmezukunft 2050. Erfordernisse und Konsequenzen der Dekarbonisierung von Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Österreich*. TU Wien.
- Krausmann, F., Schandl, H., Eisenmenger, N., Giljum, S., & Jackson, T. (2017). Material Flow Accounting: Measuring Global Material Use for Sustainable Development. *Annual Review of Environment and Resources*, 42, 647-675. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060726>.
- Mayer, A., Haas, W., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Nuss, P., & Blengini, G. A. (2019). Measuring Progress towards a Circular Economy: A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 62-76. <https://doi.org/10.1111/jiec.12809>.
- Morseletto, P. (2020). Targets for a circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, 104553. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104553>.
- Nørgaard, J., & Xue, J. (2016). Between Green Growth and Degrowth: Decoupling, Rebound Effects and the Politics for Long-Term Sustainability. In Santarius, T., Walnum, H. J., & Aall, C. (Hrsg.), *Rethinking Climate and Energy Policies. New Perspectives on the Rebound Phenomenon* (S. 267-284). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38807-6_15.
- Österreichische Energieagentur (2017). *Szenarien für Strom- und Fernwärmeaufbringung im Hinblick auf Klimaziele 2030 und 2050. Endbericht zu Strom und Fernwärme in den Szenarien "WEM" und "WAM plus"*.

- Österreichisches Institut für Bautechnik (2007). *OIB-Richtlinien 2007*. <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien/richtlinien/2007>.
- Österreichisches Institut für Bautechnik (2019). *OIB-Richtlinien 2019*. <https://www.oib.or.at/oib-richtlinien/richtlinien/2019>.
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. *Planbureau Voor de Leefomgeving*, (2544). <https://dspace.library.uu.nl/handle/1874/358310>.
- Statistik Austria (2023). Standard-Dokumentation Metainformationen (Definitionen, Erläuterungen, Methoden, Qualität) zur Materialflussrechnungen. https://www.statistik.at/fileadmin/shared/QM/Standarddokumentationen/RW/std_r_materialflussrechnungen.pdf.
- Statistik Austria (2024a). *Umweltgesamtrechnungen Modul Materialflussrechnung. Zeitreihe 2000 bis 2022. Projektbericht*.
- Statistik Austria (2024b). *Energiebilanz 2023*.
- Umweltbundesamt (2016). *Szenario erneuerbare Energie 2030 und 2050*. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0576.pdf>.
- Umweltbundesamt (2021). *GHG Projections and Assessment of Policies and Measures in Austria*.
- Umweltbundesamt (2022). *Austria's Annual Greenhouse Gas Inventory 1990-2020*.
- Umweltbundesamt (2023a). *GHG Projections and Assessment of Policies and Measures in Austria*.
- Umweltbundesamt (2023b). *Energie- und Treibhausgasszenarien 2023. WEM, WAM und Transition mit Zeitreihen von 2020 bis 2050*. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0882.pdf>.