

TEXTE

29/2025

Modellierung von SDG-Wechselwirkungen in Deutschland

Deutschsprachige Zusammenfassung des Forschungsvorhabens „Integrated Assessment of the UN Sustainable Development Goals (SDGs) in Transformation Pathways towards a Resource-Efficient and Greenhouse-Gas-Neutral Germany“

von:

Mark Meyer, Alice Philippi
Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, Osnabrück

Nathalie Spittler

Millennium Institute, Washington D.C.
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 29/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 31 101 0
FB001557

Modellierung von SDG-Wechselwirkungen in Deutschland

Deutschsprachige Zusammenfassung des
Forschungsvorhabens „Integrated Assessment of the UN
Sustainable Development Goals (SDGs) in Transformation
Pathways towards a Resource-Efficient and Greenhouse-
Gas-Neutral Germany“

Von:

Mark Meyer, Alice Philippi
Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung,
Osnabrück

Nathalie Spittler
Millennium Institute, Washington D.C.
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung des Vorhabens:

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH
Heinrichstraße 30
49080 Osnabrück
Deutschland

Abschlussdatum:

Oktober 2024

Redaktion und Fachbegleitung:

Fachgebiet I 1.1 „Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,
Ressourcenschonung“
Philip Nuss

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7541>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Februar 2025

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

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 6 |
| 1 Einleitung..... | 7 |
| 1.1 Administrativer Hintergrund und inhaltliche Zielsetzung des Vorhabens..... | 7 |
| 1.2 Struktur der vorliegenden Kurzzusammenfassung..... | 10 |
| 1.2.1 Ausblick auf Kapitel 2..... | 10 |
| 1.2.2 Ausblick auf Kapitel 3..... | 11 |
| 1.2.3 Ausblick auf Kapitel 4..... | 12 |
| 2 Kurzzusammenfassung des methodischen Sachstandes | 14 |
| 2.1 Zielsetzung der eigenen Meta-Analyse..... | 14 |
| 2.2 Wesentliche Befunde..... | 14 |
| 2.2.1 Identifizierte Bewertungsmethoden, Modellkategorien und Modellanwendungen | 14 |
| 2.2.2 Entwicklungshintergrund des systemdynamischen iSDG-Modells..... | 17 |
| 3 Anwendung des Modells iSDG zur Bewertung von Transformationspfaden der deutschen Volkswirtschaft..... | 18 |
| 3.1 Methodische Anmerkungen | 18 |
| 3.1.1 Vorstellung zentraler Modellmodule..... | 18 |
| 3.1.2 Modellkalibrierung und Basisszenario..... | 20 |
| 3.2 Zusammenfassung der modellierten Alternativszenarien..... | 23 |
| 3.2.1 Industrielle Produktion (inklusive Abfall und Abwasser)..... | 23 |
| 3.2.2 Mobilität | 23 |
| 3.2.3 Landwirtschaft und Landnutzung | 24 |
| 3.2.4 Bauen und Wohnen | 24 |
| 3.2.5 Energieversorgung..... | 25 |
| 3.2.6 Politische Maßnahmen | 26 |
| 3.3 Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse für Deutschland..... | 27 |
| 3.3.1 Zentrale Simulationsergebnisse..... | 27 |
| 3.3.1.1 Kernergebnisse | 27 |
| 3.3.1.2 SDG-Entwicklungen im kombinierten PolitikszENARIO im Vergleich zum Basisszenario..... | 29 |
| 3.3.2 Detailanmerkungen zu individuellen Simulationsergebnissen..... | 31 |
| 3.3.2.1 Industrielle Produktion | 31 |
| 3.3.2.2 Mobilität | 32 |
| 3.3.2.3 Landwirtschaft und Landnutzung | 33 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3.3.2.4 | Bauen und Wohnen | 34 |
| 3.3.2.5 | Energieversorgung | 36 |
| 3.3.2.5.1 | Elektrizitätserzeugung | 36 |
| 3.3.2.5.2 | Einfluss der CO ₂ -Steuer | 37 |
| 4 | Zusammenfassung und Ausblick | 38 |
| 4.1 | Zusammenfassung der im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse | 38 |
| 4.2 | Ausblick auf verbleibenden Forschungsbedarf | 41 |
| | Referenzen | 44 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Übersicht der 17 Sustainable Development Goals..... | 8 |
| Abbildung 2: | Projektion des iSDG-Modells für die Gesamtbevölkerung und das BIP-Wachstum in Deutschland..... | 21 |
| Abbildung 3: | SDG-Zielerreichungsgrade in Deutschland (Status quo und Baselineprojektion für 2050)..... | 22 |
| Abbildung 4: | Zeitplan für die politischen Maßnahmen in den Szenarien | 26 |
| Abbildung 5: | Entwicklung von Bruttoinlandsprodukt, Staatsschuld, inländischem Rohstoffkonsum und inländischen Treibhausgasemissionen in den Simulationen | 28 |
| Abbildung 6: | SDG Zielerreichungen (Mittelwerte der jeweiligen Indikatoren) im Jahr 2050 | 30 |
| Abbildung 7: | Detailentwicklungen im Industrie-Szenario | 31 |
| Abbildung 8: | Veränderungen des Fahrzeugbestands im Mobilitätsszenario | 33 |
| Abbildung 9: | Veränderung von Kraftstoffnachfrage und Treibhausgasemissionen im Mobilitätsszenario | 33 |
| Abbildung 10: | Detailentwicklungen im Handlungsfeld Landwirtschaft und Landnutzung | 34 |
| Abbildung 11: | Detailentwicklungen im Szenario Bauen und Wohnen | 35 |
| Abbildung 12: | Entwicklung des Energieverbrauchs im Szenario Bauen und Wohnen | 36 |
| Abbildung 13: | Detailentwicklungen im Handlungsfeld Energieversorgung | 37 |

1 Einleitung

1.1 Administrativer Hintergrund und inhaltliche Zielsetzung des Vorhabens

Klima- und ressourcenpolitische Maßnahmen zielen auf eine nachhaltige Entwicklung gesellschaftlicher Lebensstile und daraus resultierender volkswirtschaftlicher Konsum- und Produktionsmuster ab.¹ Eine Beurteilung historischer wie auch zukünftig erwarteter gesellschaftlicher Entwicklungen kann dabei anhand der in der *2030 Agenda for Sustainable Development* (United Nations 2015) definierten Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (Sustainable Development Goals, SDGs) vorgenommen werden: Die Vereinten Nationen haben im Jahr 2000 acht globale Entwicklungsziele mit überwiegend entwicklungspolitischem Schwerpunkt definiert, die bis 2015 erreicht werden sollten (Millennium Development Goals, MDG). Zu diesen Zielen zählten beispielsweise die Ermöglichung einer Grundschulausbildung für alle Kinder, die Verbesserung des Umweltschutzes, die Bekämpfung übertragbarer Krankheiten (wie beispielsweise Malaria und HIV), der Aufbau einer weltweiten Entwicklungspartnerschaft sowie die Bekämpfung von Armut und Hunger (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung [BMZ] 2024). Anschließend wurden in mehrjährigen zwischenstaatlichen Verhandlungen die SDGs mit einem erweiterten Fokus ausgehandelt. Neben „klassischen Entwicklungszielen“ adressieren die SDGs auch die Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen durch nachhaltige Umweltinanspruchnahmen (wie der Nutzung von Land- oder Wasserressourcen), soziale und gesundheitliche Entwicklungsziele sowie Frieden und Sicherheit und die gemeinsame Verantwortung der Staaten zur Erreichung dieser Ziele. Damit bilden die SDGs heute einen normativen Referenzrahmen für „global goals and targets that the international community sets for itself“ (Le Blanc 2015: 11).

Abbildung 1 verdeutlicht, dass durch die SDGs für 17 unterschiedliche Dimensionen der gesellschaftlichen Entwicklung Ziele gesetzt werden. Zentrale Schlüsselindikatoren der Klimaschutz- (wie die Entwicklung nationaler Treibhausgasemissionen) und Ressourcenschonungspolitik (wie die Entwicklung nationaler Materialfußabdrücke) werden unter verschiedenen SDG-Dimensionen explizit als Zielgrößen zur Beurteilung gesellschaftlicher Entwicklungen benannt (Treibhausgasemissionen: SDG 9 und SDG 13, Materialfußabdruck: SDG 8 und SDG 12).

¹ Als ressourcenpolitische Maßnahmen werden im Folgenden Maßnahmen benannt, welche auf eine Verringerung der Nutzung primärer Rohstoffe im Sinne des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms „ProgRess III“ (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2020) abzielen. Das übergeordnete Ziel des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms besteht darin, in Verantwortung für künftige Generationen zur dauerhaften Sicherung unserer natürlichen Lebensgrundlagen beizutragen und die Entnahme und Nutzung natürlicher Ressourcen nachhaltiger zu gestalten. ProgRess legt hierfür Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette dar – von der Rohstoffgewinnung und Produktentwicklung über die Herstellung und den Verbrauch bis hin zur Kreislaufwirtschaft.

Abbildung 1: Übersicht der 17 Sustainable Development Goals



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Folke et al. (2016)

Die SDGs adressieren somit insgesamt sehr unterschiedliche, untereinander wechselseitig verknüpfte Zieldimensionen. Für eine möglichst breite SDG-Zielerreichung sollten individuelle Politikmaßnahmen daher möglichst umfassend in ihren Auswirkungen auf übrige Zielsetzungen beurteilt und in ihren Wechselwirkungen mit weiteren Maßnahmen kohärent abgestimmt werden (Nilsson, Griggs & Visbeck 2016).

Vor diesem Hintergrund wurde im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben "Integrierte Betrachtung der UN-Nachhaltigkeitsziele (SDGs) in Transformationspfaden hin zu einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland" (kurz: SDG Pathways, FKZ 3721 31 101 0) ein integrierter Modellierungs- und Bewertungsansatz zur Beurteilung zukünftiger Entwicklungen von SDG-Indikatoren in Deutschland angewandt. Dabei wurde das systemdynamische iSDG-Modell (Allen et al. 2019, 2021) auf deutsche Wirkungszusammenhänge parametrisiert und exemplarisch zur Analyse eines ambitionierten klima- und ressourcenpolitischen Transformationsszenarios der deutschen Volkswirtschaft verwendet. Diese Vorgehensweise war insbesondere dadurch begründet, dass das iSDG-Modell vor und während der Projektlaufzeit bereits mehrfach für SDG-spezifische Bewertungen alternativer Entwicklungspfade anderer Nationen angewandt wurde (Allen et al. 2024; Allen et al. 2021; Allen et al. 2019; Pedercini et al. 2019; Pedercini et al. 2018; Spittler & Kirchner 2022; Hoffmann et al. 2024; Collste, Pedercini & Cornell 2017). Da zur Bewertung nationaler Entwicklungen im Kontext der SDGs durch das iSDG-Modell international etablierte Indikatoren simuliert werden,² sind die in diesem Bericht zusammengefassten Befunde unmittelbar mit Simulationsergebnissen der hier referenzierten Forschungsaktivitäten vergleichbar. Allerdings muss eingeräumt werden, dass diese Vorgehensweise damit insbesondere in ihrem ressourcenpolitischen Berichtsumfang beschränkt bleibt, da durch das iSDG-Modell keine simultane Bewertung sonstiger Entwicklungen außerhalb der analysierten Volkswirtschaft vorgenommen wird.

² Diese Indikatoren sind Bestandteil des Global Indicator Framework for the Sustainable Development Goals and Targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development der Vereinten Nationen. Siehe hierzu <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list> (abgerufen am 26. Juni 2024).

TextBox 1: Projekthintergrund: Das GreenSupreme-Szenario der RESCUE-Studie

- ▶ In der RESCUE-Studie (Günther et al. 2019) hat das Umweltbundesamt (UBA) mögliche Pfade identifiziert, um die Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2050 ressourceneffizient zu erreichen.
- ▶ Hierfür wurden insgesamt sechs Szenarien entwickelt, die mögliche technisch-technologische Veränderungen in einzelnen Handlungsfeldern sowie notwendige Lebensstiländerungen zur Erreichung der THG-Neutralität bis 2050 untersuchen. Als zusätzlicher Aspekt wurde der damit verbundene Rohstoffbedarf (Metalle, Biomasse, Baumineralien und fossile Energieträger) quantifiziert.
- ▶ Die Ergebnisse von RESCUE zeigen, dass es möglich ist, die aktuellen Klimaziele für Deutschland zu erreichen und gleichzeitig den Gesamtrohstoffbedarf zu senken, dass dies aber ambitionierte und wirtschaftsweite Veränderungen/Transformationen (über alle Handlungsfelder) innerhalb der nächsten Jahre erfordert. Die in RESCUE beschriebenen angestrebten Veränderungen/Transformationen sind auch im Kontext z.B. des EU Green Deal von Bedeutung.
- ▶ Zur Erreichung der Treibhausgasneutralität bewertet die Studie Anpassungen in den Handlungsfeldern Energieversorgung, Mobilität, industrielle Produktion, Landwirtschaft und Landnutzung, Bauen und Wohnen sowie Abfall und Abwasser. Von den Auswirkungen auf Rohstoffinanspruchnahmen abgesehen wurden die in RESCUE beschriebenen Pfade nicht in ihren Auswirkungen auf weitere Nachhaltigkeits- und Umweltziele untersucht.
- ▶ Im gegenständigen Vorhaben wurde das systemdynamische Modell iSDG in Anlehnung an das „GreenSupreme“ Szenario der RESCUE-Studie (Dittrich et al. 2020) parametrisiert, um weitergehende SDG-Wechselwirkungen in ihren Auswirkungen zu beurteilen.

Quelle: Eigene Zusammenfassung in Anlehnung an Kernpunkte der Leistungsbeschreibung des gegenständigen Vorhabens.

Für die Parametrisierung des Transformationsszenarios diente dabei die RESCUE-Studie (Günther et al. 2019) als zentrale Referenz (siehe hierzu TextBox 1). Die Durchführung des SDG Pathways Vorhabens erfolgte in den Jahren 2021 bis 2024 unter Leitung der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS, Osnabrück, Deutschland) in Zusammenarbeit mit dem Millennium Institute (MI, Washington D.C., Vereinigte Staaten) sowie dem Centre d'excellence Jean Monnet (ERASME, Clermont-Ferrand, Frankreich).

1.2 Struktur der vorliegenden Kurzzusammenfassung

1.2.1 Ausblick auf Kapitel 2

Während sämtliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des SDG Pathways Vorhabens in einem englischsprachigen Abschlussbericht ausführlich dokumentiert werden,³ dient die vorliegende Kurzfassung der Zusammenfassung zentraler Ergebnisse des Vorhabens. Die Darstellung orientiert sich dabei an der inhaltlichen Unterteilung der Arbeiten in eine **anfängliche thematische Bestandsaufnahme** sowie die **nachfolgende Parametrisierung und Anwendung des iSDG-Modells für Deutschland**. Für die thematische Bestandsaufnahme **wurden in einer Meta-Analyse 1701 Datenbankeinträge wissenschaftlicher Publikationen systematisch erfasst und anschließend statistisch wie auch inhaltlich ausgewertet**.

Vor dem Hintergrund dieser Analyse lässt sich zunächst festhalten, dass seit Verabschiedung der SDGs durch alle UN-Mitgliedstaaten im Jahr 2015 bereits eine Vielzahl von Methoden in der angewandten Nachhaltigkeitsforschung angewandt wurde, um SDG-relevante Entwicklungen individuell sowie in unterschiedlichen Nexuszusammenhängen zu analysieren. In der eigenen Meta-Analyse wurden insbesondere **Integrierte Assessment Modelle (IAM) und dynamische makroökonomische Modelle** als **grundsätzlich für gesamtwirtschaftliche ex ante Bewertungen des Klima- und Ressourcenschutz-Nexus verfügbare Methoden** identifiziert. Mit dieser Feststellung werden Befunde vergleichbarer früherer Literaturstudien zu Anwendungsmöglichkeiten dynamischer Simulationsmodelle zusammengeführt und aktualisiert. Siehe diesbezüglich bspw. Aguilar-Hernandez, Dias Rodrigues und Tukker (2021); van Soest et al. (2019) oder UNEP (2017). In Übereinstimmung mit einer thematisch vergleichbaren Bestandsaufnahme der Gemeinsamen Forschungsstelle (JRC) der Europäischen Kommission (Barbero Vignola et al. 2020) halten wir damit fest, dass unterschiedliche dynamische Modelle in der Lage sind, über viele SDG-relevante Entwicklungen und Indikatoren zu berichten und die bislang beobachteten historischen Entwicklungen in die Zukunft weiter fortzuschreiben. Die konkrete Entscheidung zur Auswahl eines (oder auch mehrerer) Modelle für eigene Analysen muss daher in der Regel vor Hintergrund des jeweiligen thematischen Analyseschwerpunkts getroffen und bezüglich der daraus resultierenden Systemgrenzen der Analyse sorgfältig dokumentiert werden.

Im Hinblick auf Simulationseigenschaften und Berichtsumfang kann das im weiteren Verlauf des Vorhabens genutzte systemdynamische iSDG-Modell als ein Integriertes Assessment Modell klassifiziert werden. Dabei zeichnet es sich insbesondere dadurch aus, dass es die Entwicklung einer Vielzahl international etablierter und vergleichbarer SDG-Indikatoren in einem integrierten Bewertungsrahmen fortschreibt. Seit Verabschiedung der Agenda 2030 wurde das iSDG-Modell daher bereits mehrfach in unterschiedlichen regionalen Kontexten zur Bewertung von SDG-Zielerreichungen angewandt (Allen et al. 2024; Allen et al. 2021; Allen et al. 2019; Pedercini et al. 2019; Pedercini et al. 2018; Spittler & Kirchner 2022; Hoffmann et al. 2024; Collste, Pedercini & Cornell 2017).

³ Siehe hierzu auch die zugehörige Projekthomepage: <https://www.umweltbundesamt.de/sdgpathways> (abgerufen am 4. März 2024).

1.2.2 Ausblick auf Kapitel 3

Durch die Leistungsbeschreibung des gegenständigen Vorhabens wurden für die Bewertung von SDG-Wechselwirkungen und -Zielerreichungen in integrierten klima- und ressourcenpolitischen Szenariomodellierungen zwei zentrale Leitfragen vorgegeben:

1. Welche **Synergien oder Zielkonflikte** bestehen **zwischen SDGs** der Agenda 2030 **und den im RESCUE GreenSupreme Szenario angestrebten klima- und ressourcenpolitischen Transformationen**?
2. **Wie sind ambitionierte klima- und ressourcenpolitische Transformationen auszugestalten**, um eine möglichst hohe SDG-Zielerreichung zu gewährleisten?

Zur inhaltlichen Bearbeitung dieser Forschungsfragen konnte das Forschungskonsortium auf das iSDG-Modell zurückgreifen.⁴ **Da das Projekt explizit an international thematisch vergleichbare Forschungsaktivitäten anknüpfen sollte** und die Befunde der eigenen Meta-Studie das iSDG-Modell als eine international bereits mehrfach für SDG-spezifische Bewertungen alternativer Entwicklungspfade angewandte Methode identifizierten, **wurde zur Analyse der hier aufgeführten Leitfragen das iSDG-Modell im weiteren Verlauf des Vorhabens aktualisiert und kalibriert**. Zur Umsetzung dieser Arbeitsschritte musste der übliche iSDG-Bewertungsansatz nicht nur auf deutsche Wirkungszusammenhänge angepasst, sondern **insbesondere zur Abbildung unterschiedlicher ressourcenpolitischer Handlungsfelder des „Green-Supreme“-Szenarios wesentlich erweitert** werden. Entsprechende **Änderungen wurden im Kern der ökonomischen Modellierung, wie auch in weiteren** (zentrale Wirkungszusammenhänge der RESCUE-Studie beschreibenden) **Modulen des iSDG-Modells** vorgenommen. Diese Entwicklungsarbeiten, wie auch die **Anwendungen des für Deutschland angepassten iSDG-Modells** zur Bewertung von SDG-Zielerreichungen⁵ und -Wechselwirkungen unter zusätzlicher Berücksichtigung von im „GreenSupreme“-Szenario der RESCUE Studie unterstellten Umstellungen zur Erreichung umfassender klima- und ressourcenpolitischer Transformationen, werden in **Kapitel 3** zusammengefasst.

Von bereits hohen SDG-Zielerreichungsgraden⁶ ausgehend, führen die in den Simulationen unterstellten zusätzlichen Umstellungen in der Regel zu einer Steigerung der SDG-Zielerreichungsgrade. **Signifikante Zielkonflikte mit den Zielsetzungen der Agenda 2030 können nicht identifiziert werden**: Im Jahr 2050 ist das klima- und ressourcenpolitische PolitikszENARIO im Vergleich zur Baseline dadurch geprägt, dass vor allem Verbesserungen bei den SDG-Zielerreichungsgraden simuliert werden. Insbesondere im Hinblick auf SDG 2 (kein Hunger), SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie), SDG 12 (nachhaltige/r Konsum und Produktion) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) werden unter Berücksichtigung der zusätzlichen klima- und ressourcenpolitischen Umstellungen deutliche Verbesserungen der SDG-Zielerreichung in Deutschland simuliert. Weitere, wenn auch weniger prägnante Verbesserungen der Zielerreichung zeigen sich zudem für SDG 6 (sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen), SDG 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum) und SDG 9 (Industrie,

⁴ Die für gesamtwirtschaftliche Bewertungen von Transformationspfaden geeigneten Modelle wurden in langjährigen Entwicklungsprozessen von eigenständigen Institutionen entwickelt und sind daher in der Regel nicht frei zugänglich. Dies gilt sowohl für Integrierte Assessment Modelle als auch für makroökonomische sowie systemdynamische Modelle.

⁵ Für die einzelnen Indikatoren werden die jeweiligen Zielerreichungsgrade stets als Verhältnis zwischen

- der Abweichung der aktuellen Indikatoreausprägung von einem internationalen „worst performance“ Referenzwert (zero level), sowie
- der Differenz zwischen dem vorgegebenen Zielwert und dem internationalen „worst performance“ Referenzwert (zero level) berechnet.

⁶ Ein 100% Zielerreichungsgrad würde bedeuten, dass alle im iSDG mit Indikatoren hinterlegten Targets erreicht sind. Zu beachten ist, dass das iSDG-Modell ursprünglich für die Bewertung der Entwicklungsperspektiven von Ländern mit niedrigem Einkommen konzipiert wurde. Viele der modellierten SDG-Indikatoren sind daher insbesondere für Ländergruppen mit niedrigem Einkommen relevant.

Innovation und Infrastruktur). Dies resultiert zum einen daraus, dass diesen SDGs einige klima- und ressourcenrelevante Indikatoren zugrunde liegen (v.a. SDG 12, 13, 6, 8, 9), die durch die in RESCUE definierten Politiken positiv beeinflusst werden. Zum anderen wirken die den RESCUE Szenarien zugrunde liegenden Politiken, sowohl auf den Landwirtschafts- als auch Energiesektor, was sich positiv auf die Zielerreichung der damit verknüpften SDGs 2 und 7 auswirkt.

Für die Politiksimulation kennzeichnend ist dabei ihr Green Growth-Charakter: Während die simulierten klimapolitischen Umstellungen tendenziell dämpfend auf das Wirtschaftswachstum wirken,⁷ werden diese dämpfenden ökonomischen Effekte in der integrierten klima- und ressourcenpolitischen Transformation durch deutliche expansive ökonomische Effekte der unterstellten Circular Economy-Umstellungen überkompensiert.⁸ Trotz dieser expansiven ökonomischen Effekte erreichen die simulierten Umstellungen (z. B. durch Steigerungen der gesamtwirtschaftlichen Materialeffizienz) bis zum Jahr 2050 ein Rückgang des inländischen Rohstoffkonsums (Domestic Material Consumption, DMC) um 40 % im Vergleich zur Baseline. Die klimapolitischen Annahmen des Politik Szenarios implizieren bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 84 % im Vergleich zu den Ausgangsniveaus des Jahres 1990. Diese, mit einer **globalen Einhaltung des 2°C-Ziels kompatiblen Emissionsreduktionen**, werden ohne Modellierung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung simuliert.

1.2.3 Ausblick auf Kapitel 4

Das abschließende Kapitel 4 fasst die zentralen Erkenntnisse aus diesem Vorhaben zusammen. Vor Hintergrund der eigenen Meta-Analyse wird dabei zunächst festgehalten, dass die Bedeutung der Entwicklungsziele der Agenda 2030 und der dabei zu beachtenden Wechselwirkungen in der Nachhaltigkeitsforschung bereits umfassend thematisiert und erforscht wurden. Siehe hierzu bspw. die Korrelationsanalysen von Bali Swain und Ranganathan (2021), Miola et al. (2019) oder Pradhan et al. (2017). Als wesentlicher empirischer Befund entsprechender Analysen ist festzuhalten, dass **Wirkungsrichtung und Ausmaß individueller SDG-Wechselwirkungen** keinen universell gültigen Gesetzmäßigkeiten folgen. Stattdessen **unterliegen** diese stets **unterschiedlichen regionalen Kontexten**: „In fact, the nature of any inter-linkage often depends on the context of the respective country, the level of development, geographical scale and other characteristics and specific policies which might determine if a given inter-linkage constitutes a trade-off or a synergy“ (Miola et al. 2019: 19).

Integrierte Simulationsmodelle sind in der Lage, entsprechende Wechselwirkungen in ihrem Zusammenspiel systematisch abzubilden. Nach Kalibrierung auf die jeweils relevanten regionalen Kontexte, ermöglichen integrierte Simulationsmodelle eine kohärente Planung zukünftiger Nachhaltigkeitsentwicklungen anhand der Befunde umfassender alternativer Szenariosimulationen (Allen, Metternicht & Wiedmann 2016; Collste, Pedercini & Cornell 2017). Zur Berücksichtigung deutscher Wirkungskontexte wurde in diesem Forschungsprojekt **das integrierte Simulationsmodell iSDG substanziell erweitert und beispielhaft für eine erste Analyse eines klima- und ressourcenpolitischen Transformationspfades angewandt.** Dank dieser Entwicklungsarbeiten liegt nun eine iSDG-Modellversion für Deutschland vor, welche sich im Umfang der abgebildeten Wirkungszusammenhänge deutlich von anderen system-

⁷ Da in diesem Szenario keine zusätzlichen Finanzierungsmöglichkeiten, wie beispielsweise Erhöhung der Steuern, simuliert wurde, werden die zur Verfügung stehenden Mittel (in diesem Fall die gesamten Staatsausgaben anteilig am BIP) umverteilt.

⁸ Durch die Effizienzsteigerungen, die den RESCUE Szenarien zugrunde liegen, steigt die Produktivität, was sich kurz- und langfristig, positiv auf das Wirtschaftswachstum auswirkt. Der Effekt, dass rohstoffimportierende Industrienationen wie Deutschland von ambitionierten Steigerungen der Ressourceneffizienz gesamtwirtschaftlich profitieren, wurde in der Vergangenheit auch bereits in multiregionalen Simulationsstudien aufgezeigt (Distelkamp und Meyer (2019); Hatfield-Dodds et al. (2017)). Anzumerken ist allerdings, dass eine exakte Bewertung der Größenordnung dieses Effekts ausgesprochen herausfordernd ist, da die direkten Kosten zur Realisierung der simulierten Effizienzsteigerungen in der Regel nur geschätzt werden können.

dynamischen Modellierungen wie bspw. jenen der thematisch vergleichbaren Modellierungen der Earth 4 All initiative (Dixon-Decleve et al. 2022) abhebt und auch im Vergleich zu früheren Anwendungen des iSDG-Modells (Allen et al. 2019, 2021; Pedercini et al. 2019; Pedercini et al. 2018) deutlich erweitert wurde. Diese erweiterte Modellversion für Deutschland wurde zum Projektabschluss (gemeinsam mit sämtlichen Simulationsergebnissen) an das Umweltbundesamt übergeben und kann daher von den dort Forschenden in eigenen Folgeanalysen weiterverwendet werden.⁹

Während das Vorhaben damit **alle vorgegebenen Projektziele erfolgreich erreicht** hat, verbleiben weitergehende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für zukünftige Forschungsvorhaben. Während in der wissenschaftlichen Literatur die Bedeutung interdisziplinärer Forschungs- und Beratungsprozesse zur Identifikation relevanter SDG-Wechselwirkungen betont wird (siehe hierzu bspw. International Council for Science [ICSU] 2017), wurde in diesem Vorhaben ein bereits existierender Bewertungsansatz erstmals für Deutschland angewandt. Das von uns genutzte iSDG-Modell wurde entwickelt, um die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Politiken zu erfassen. Dabei betrachtet es ausschließlich Entwicklungen im Inland. Zudem erfolgt keine vertiefte Abbildung sektoraler Details. Für zukünftige Bewertungen von Synergien und Zielkonflikten zwischen Klima- und Ressourcenschutz und den SDGs werden daher weitergehende, idealerweise interdisziplinäre Evaluationen der gegebenen Modellstrukturen empfohlen.

Dies betrifft einerseits die in den Modellierungen und darauf aufbauenden Berichterstattung genutzten Indikatoren: Nicht sämtliche der durch die iSDG-Modellstrukturen abgebildeten Spillover-Effekte¹⁰ konnten in den Anwendungen für Deutschland beobachtet werden. Da für die meisten der durch das Modell abgebildeten Indikatoren bereits zu Beginn des Simulationszeitraums sehr hohe SDG-Zielerreichungswerte beobachtet werden, erweisen sich die in den Simulationen abgebildeten Veränderungen oftmals als gering. Dadurch wird automatisch auch das Potenzial zur Auslösung von Spillover-Effekten gedämpft.

Zudem kann für einzelne Spillover-Effekte des hier simulierten Politik Szenarios nicht abschließend ausgeschlossen werden, dass diese durch die vorliegenden Modellstrukturen noch nicht vollständig abgebildet werden. Die zum Ende von Kapitel 4 abschließend erfolgende Benennung zentraler Wirkungskanäle, welche in zukünftigen Weiterentwicklungen der aktuellen iSDG-Parametrisierung für Deutschland umfassender modelliert werden könnten, verweist auf die diesbezüglich relevant erscheinenden verbleibenden methodischen Entwicklungsoptionen. Aus Sicht der Ressourcenschonungspolitik erscheint diesbezüglich insbesondere der Hinweis wichtig, dass globale Wechselwirkungen in unseren Simulationen unberücksichtigt bleiben. Es bleibt daher zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben vorbehalten, auch die aus globalen Wirkungszusammenhängen resultierenden Einflüsse auf SDG-Indikatoren wie bspw. dem Materialfußabdruck unter Anwendung erweiterter Bewertungsansätze zu analysieren.

⁹ Das Modell steht auf Anfrage für nicht kommerzielle Zwecke und nach Unterzeichnung eines Non-Disclosure-Agreements zur Verfügung. Dafür bitte direkt beim UBA anfragen, das sich dann mit den Projektpartnern in Verbindung setzt.

¹⁰ Spillover-Effekte beziehen sich auf indirekte Auswirkungen gesetzter Maßnahmen, die nicht nur den primär zu beeinflussenden Faktor, sondern auch andere Faktoren betreffen.

2 Kurzzusammenfassung des methodischen Sachstandes

2.1 Zielsetzung der eigenen Meta-Analyse

Das “SDG Pathways“-Vorhaben zielte insbesondere darauf ab, die Auswirkungen langfristiger klima- und ressourcenschonungspolitischer Umstellungen auf zukünftige Entwicklung in Deutschland unter Nachhaltigkeitsaspekten zu bewerten. Zur einleitenden Bestandsaufnahme wurde hierzu zunächst ein umfassender Überblick der zur Abbildung und Bewertung von SDG-Wechselwirkungen verfügbaren Methoden erstellt. Dabei wurden die Abstracts von **275 systematisch ausgewählten wissenschaftlichen Publikationen in einer Meta-Analyse inhaltlich bewertet**, um insgesamt 40 dieser Publikationen für eine umfassende Volltextanalyse auszuwählen. Da die dabei verfolgte Vorgehensweise im englischsprachigen Abschlussbericht ausführlich dokumentiert ist, wird aus Platzgründen an dieser Stelle auf eine Wiedergabe entsprechender methodischer Details verzichtet.

Während vergleichbare Literaturstudien in der Vergangenheit bereits von unterschiedlichen Forschungsteams durchgeführt wurden (siehe hierzu bspw. die frühe Übersichtsstudie von Allen, Metternicht und Wiedmann (2016) zu verfügbaren Methoden für ex ante Szenario-bewertungen sowie die weit gefasste JRC-Studie von Miola et al. (2019) oder aber den allgemeinen Überblick zu veröffentlichten SDG-Interaktionsanalysen von Bennich, Weitz und Carlsen (2020)), **zeichnet sich unsere Meta-Studie durch ihren konkreten thematischen Fokus auf klima- sowie ressourcenschonungspolitische Anwendungen aus.** Neben diesem thematischen Fokus erfolgte **zudem eine methodische Fokussierung auf integrierte gesamtwirtschaftliche Szenariobewertungen.**

Dabei wurden, zur angemessenen Berücksichtigung der vorwärtsgerichteten zeitlichen Analyseperspektive des Vorhabens (ex ante Bewertungen), **auch quantitative Modellierungsansätze berücksichtigt, welche zuvor noch nicht explizit im Kontext von SDG-Interaktionsanalysen angewandt wurden.** Siehe bspw. UNEP (2017) oder Aguilar-Hernandez, Dias Rodrigues und Tukker (2021) für methodische Verweise auf für SDG-Kontextanalysen relevante Modelle, welche nicht explizit im Kontext von SDG-Analysen veröffentlicht wurden. **Eine entsprechend weit gefasste methodische Bestandsaufnahme ist wichtig, da die SDGs** (und die zur Bewertung von SDG-Zielerreichungen hergeleiteten Indikatoren) **unterschiedliche Nachhaltigkeitsdimensionen adressieren.** Zur Bewertung der jeweiligen Zielerreichungen werden klimapolitische Indikatoren (wie Treibhausgasemissionen) explizit unter SDG 9 und SDG 13 betrachtet. Indikatoren der Ressourcenschonungspolitik (wie der Materialfußabdruck) dienen zur Bewertung der Zielerreichung unter SDG 8 und SDG 12. **Auch in diesem Vorhaben waren daher unterschiedliche Dimensionen der Nachhaltigkeit simultan abzubilden und zu bewerten:** Während unter SDG 8, SDG 9 und SDG 12 die wirtschaftliche Dimension der Nachhaltigkeit betrachtet wird, verkörpert SDG 13 ein wesentliches Ziel der ökologischen Nachhaltigkeit.

2.2 Wesentliche Befunde

2.2.1 Identifizierte Bewertungsmethoden, Modellkategorien und Modellanwendungen

SDG-Wechselwirkungen wurden bereits mit sehr unterschiedlichen Methoden abgebildet, analysiert und bewertet. Dem Abschlussbericht können daher weitreichende Literaturverweise zu Anwendungsbeispielen für die nachfolgend (zusammenfassend) aufgeführten Methoden entnommen werden:

- ▶ Cross-Impact Matrizen,
- ▶ Faktoranalysen,
- ▶ Kausalitätstests,
- ▶ Korrelationsanalysen,
- ▶ Netzwerk Analysen,
- ▶ Ökonometrische Regressionsanalysen,
- ▶ Statische Input-Output-Analysen,
- ▶ Trendanalysen,
- ▶ Statistisch-mathematische Test- und Modellierungsverfahren.

An dieser Stelle sei hierzu nur allgemein angemerkt, dass diese Methoden in der Regel nur zur Analyse historischer Entwicklung von SDG-Indikatoren verwendet wurden. Für individuell ausgewählte SDG-Indikatoren können dabei auch Wechselwirkungen (in der Regel paarweise) analysiert und bewertet werden. **Eine integrierte Betrachtung der den beobachteten Indikatorentwicklungen zugrundeliegenden Kausalitäten kann unter ausschließlicher Verwendung dieser Methoden allerdings nicht erreicht werden.** Mit der Feststellung, dass unter der Vielzahl der bereits publizierten SDG-Indikatoranalysen lediglich wenige Studien auf einer Anwendung integrierter Modelle beruhen, bestätigt unsere Meta-Analyse unter anderem einen zentralen Befund von Barbero Vignola et al. (2020).¹¹

Zur Beurteilung der Auswirkungen zukünftiger Transformationsentwicklungen müssen dynamische integrierte „large scale“ (Hafner et al. 2020) Modelle angewandt werden. In Anlehnung an weitere Überblicksstudien (Allen, Metternicht & Wiedmann 2016; Hafner et al. 2020; UNEP 2017; van Soest et al. 2019) identifizieren wir **drei grundsätzlich geeignete integrierte Bewertungsansätze**, welche in entsprechenden Simulationsstudien angewandt werden können. Diese zeichnen sich jeweils dadurch aus, dass sie **gesamtwirtschaftliche Wechselwirkungsanalysen** ermöglichen:¹²

- ▶ **Integrated Assessment Modelle (IAM)** können allgemein als gesamtwirtschaftliche Modellierungen beschrieben werden, welche sich durch eine sehr detaillierte Abbildung ökologischer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auszeichnen. Die unter Anwendung von IAMs (im Auftrag des Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, wie auch in zahlreichen individuellen Anwendungen) durchgeführten Analysen zu Auswirkungen des Klimawandels dokumentieren eine lange Entwicklungs- und Anwendungstradition. Ein umfassender Überblick zu IAM und deren Möglichkeiten zur Abbildung von SDG-Entwicklungen wurde von van Soest et al. (2019) veröffentlicht. Diesem Überblick kann entnommen werden, dass durch den Großteil bisheriger IAM-Anwendungen Entwicklungen im Kontext von SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) sowie die Auswirkungen von Klimaschutzmaßnahmen auf Ziele des SDG 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirt-

¹¹ Barbero Vignola et al. (2020) beurteilten 108 Modelle und Modellierungstools des JRC bezüglich ihrer Anwendungsmöglichkeiten zur Bewertung von SDG-Entwicklungen. Zu den zentralen Erkenntnissen ihrer Analyse gehört unter anderem folgende Feststellung: „The first clear finding is that in-house JRC models already are able to cover many of the SDGs targets and indicators. Nonetheless, except for a few existing frameworks, this is not done in an integrated way, but rather through many different sectorial models.“ Barbero Vignola et al. (2020: 5)

¹² Siehe zu den Vorzügen gesamtwirtschaftlicher „macro frameworks“ im Vergleich zu nicht-integrierten sektoralen Studien auch wiederum Barbero Vignola et al. : “macro framework models are likely to be more useful for undertaking system-level or economy-wide scenario analysis driven by the national long-term goals and targets, and for exploring trade-offs and synergies among sectors” Barbero Vignola et al. (2020: 10).

schaftswachstum) analysiert wurden. Unter anderem eigene Studien von Mitgliedern unseres Forschungskonsortiums verdeutlichen allerdings, dass die sehr detaillierte Abdeckung biophysikalischer Wirkungszusammenhänge durch IAM in der Regel mit einer lediglich rudimentären Abdeckung sozialer und wirtschaftlicher Wirkungszusammenhänge einhergeht (Meyer, Löschel & Lutz 2021).¹³

- ▶ Im Gegensatz dazu zeichnen sich (umweltökonomisch erweiterte) **Makroökonomische Modelle** durch eine weitreichende und sehr detaillierte Abbildung ökonomischer Wechselwirkungen aus (Hafner et al. 2020). Da eine hinreichende Abdeckung ökonomischer Wirkungszusammenhänge nicht nur für SDG-Wirkungsanalysen als elementare methodische Voraussetzung anzusehen ist,¹⁴ wird auch für diese Modellklasse eine langjährige Entwicklungs- und Anwendungstradition durch die wissenschaftliche Literatur belegt. So identifizieren bspw. Aguilar-Hernandez, Dias Rodrigues und Tukker (2021) in einer eigenen Meta-Analyse der bisherigen Bewertungen von gesamtwirtschaftlichen Effekten von Circular Economy Szenarien 17 relevante Simulationsstudien, welche auf einer Anwendung makroökonomischer Modelle basieren. Siehe auch McCarthy, Dellink und Bibas (2018) für thematisch vergleichbare weiterführende Literaturverweise. Am Beispiel des von der GWS entwickelten globalen Modells GINFORS, welches zuletzt in der Modellversion GINFORS₃ für das Umweltbundesamt zur Bewertung klima- und ressourcenpolitischer Transformationspfade angewandt wurde (Meyer, Hirschnitz-Garbers & Distelkamp 2018), wird im Abschlussbericht der Berichtsumfang eines insbesondere (aber nicht ausschließlich) zur Simulation von SDG-Entwicklungen im Kontext der SDGs 8, 9 und 12 geeigneten makroökonomischen Modells exemplarisch vorgestellt. Siehe auch Distelkamp und Meyer (2019) als einen weiteren Verweis auf bisherige Anwendungen des dynamischen Modells GINFORS₃ in Simulationen von globalen Circular Economy Szenarien.
- ▶ **Systemdynamische Modelle** werden allgemein durch die integrierte Modellierung von Strom- und Bestandsgrößen (stock-flow modelling) und daraus resultierenden Pfadabhängigkeiten charakterisiert. Bei näherer Betrachtung der in diesem Vorhaben analysierten Anwendungen kann dieser Kategorisierungsansatz kritisch hinterfragt werden, da Systemeigenschaften wie Ungleichgewichte und Pfadabhängigkeiten auch durch nicht-systemdynamische „large scale“-Modellen abgebildet werden können.¹⁵ Unsere Entscheidung zur eigenständigen Berücksichtigung von systemdynamischen Modellen als grundsätzlich geeignete Modellklasse für integrierte Bewertungen von SDG-Entwicklungen orientiert sich insbesondere an der entsprechenden Vorgehensweise bei Allen, Metternicht und Wiedmann (2016). Zudem werden systemdynamische Modelle (ebenso wie dynamische makroökonomische Modelle) in UNEP (2017) explizit als eigenständiger methodischer Ansatz zur Simulation der gesamtwirtschaftlichen Effekte von Circular Economy Szenarien erwähnt. Die Entwicklungsgeschichte des im weiteren Verlauf des gegenständigen Vorhabens weiterentwickelten und zur Bewertung von SDG-Entwicklungen für Deutschland angewandten systemdynamischen iSDG-Modells wird im folgenden Unterabschnitt eigenständig zusammengefasst.

¹³ Siehe hierzu bspw. auch die folgenden Anmerkungen hinsichtlich zukünftiger Anwendungsmöglichkeiten von IAM zur SDG-Analyse: „IAMs will need to cooperate more closely with social sciences, as understanding biophysical processes is no longer sufficient while studying SDGs (e.g. demography, governance, and poverty research)“ (van Soest et al. 2019: 218).

¹⁴ “SDGs cannot be viewed in isolation of the economic structures in which they are to be achieved” (van Zanten und van Tulder 2021: 219).

¹⁵ Tatsächlich führen bspw. van Soest et al. (2019) in ihrem Überblick zu Integrated Assessment Modellen auch das in diesem Vorhaben verwendete und von uns als systemdynamisches Modell kategorisierte iSDG-Modell auf.

2.2.2 Entwicklungshintergrund des systemdynamischen iSDG-Modells

Eine detaillierte Dokumentation zu iSDG (*Integrated Sustainable Development Goals model*) ist online auf der Homepage des Millennium Instituts (<https://isdgdoc.millennium-institute.org/en/>, abgerufen am 28. März 2024) verfügbar. Das im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte Modell ist unter folgendem Link online verfügbar:

<https://exchange.iseesystems.com/public/millenniuminstitute/isdg-germany/> (abgerufen am 11. Oktober 2024). Nachfolgend werden in der wissenschaftlichen Literatur dokumentierte Modellmerkmale zusammengefasst, welche für das gegenständliche Vorhaben von vorrangiger Bedeutung sind.

Das Modell iSDG basiert auf dem systemdynamischen Modell Threshold 21 (T21). Threshold 21 wurde ursprünglich im Umfeld der Entwicklungspolitik als ein Werkzeug zur Beurteilung mittel- bis langfristiger Strategien zur Armutsbekämpfung entwickelt. Da das Modell als Instrument zur nationalen Entwicklungsplanung konzipiert wurde, bildet Threshold 21 bereits traditionelle gesundheitliche, ökonomische und soziale Indikatoren der Entwicklungspolitik ab. Die iSDG-Modellentwickler verweisen in diesem Zusammenhang auf eine über 30-jährige Entwicklungsgeschichte mit unabhängigen nationalen Politikanalysen in mehr als 40 Ländern (Collste, Pedercini & Cornell 2017; Pedercini 2011). Eine zentrale Referenz einer Anwendung des T21-Modells für umweltökonomische Bewertungen ist zudem durch den Green Economy Report 2011 der Vereinten Nationen (UNEP 2011) gegeben.

Die Weiterentwicklung von Threshold 21 zu dem in diesem Vorhaben genutzten iSDG-Bewertungsansatz zeichnet sich dadurch aus, dass die iSDG-Simulationsergebnisse unter anderem für alle 17 SDGs über die Entwicklung ausgewählter Indikatoren berichten: Durch das *Global Indicator Framework* der Vereinten Nationen wurden insgesamt 231 unterschiedliche Indikatoren international etabliert.¹⁶ Die Grundstruktur des iSDG-Modells bildet davon 78 Indikatoren explizit in ihrer zeitlichen Entwicklung ab.¹⁷ Während entsprechende Entwicklungen zumindest implizit auch durch die Anwendung anderer Modelle bewertet werden könnten (siehe hierzu bspw. wiederum den Modellüberblick von Barbero Vignola et al. 2020), markiert die explizite Berichterstattung über diese international vergleichbaren Indikatoren in einem integrierten Bewertungsrahmen ein frühzeitig etabliertes Alleinstellungsmerkmal des iSDG-Berichtsumfangs. Seit Verabschiedung der Agenda 2030 wurde das iSDG-Modell daher bereits mehrfach in unterschiedlichen regionalen Kontexten zur Bewertung von SDG-Zielerreichungen angewandt (Allen et al. 2024; Allen et al. 2021; Allen et al. 2019; Pedercini et al. 2019; Pedercini et al. 2018; Spittler & Kirchner 2022; Hoffmann et al. 2024; Collste, Pedercini & Cornell 2017).

¹⁶ <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>, abgerufen am 28. März 2024.

¹⁷ <https://isdgdoc.millennium-institute.org/en/docs/0103-general-characteristics>, abgerufen am 28. März 2024.

3 Anwendung des Modells iSDG zur Bewertung von Transformationspfaden der deutschen Volkswirtschaft

3.1 Methodische Anmerkungen

3.1.1 Vorstellung zentraler Modellmodule

Die durch das iSDG-Modell abgebildeten Indikatorenentwicklungen beruhen jeweils auf einer integrierten Simulation von 30 miteinander interagierenden Modulen. Wesentliche durch diese Modellstrukturen abgebildete Wirkungszusammenhänge werden nachfolgend zusammengefasst.

Die **Bevölkerungsdynamik** wird in iSDG aus der allgemeinen Entwicklung von Fruchtbarkeit, Sterblichkeit und Migration hergeleitet. Die Fruchtbarkeits- und Sterblichkeitsraten unterliegen in der Modellierung sozioökonomischen Einflüssen und Umweltfaktoren.

Im Modul **Energieversorgung** wird die Primärenergieversorgung mit Gas, Öl, Kohle, Biomasse und Elektrizität berechnet. Dabei wird ein nachfrageorientierter Modellierungsansatz angewandt. Haupttreiber der Energienachfrage ist der Endenergieverbrauch (für Landwirtschaft, Industrie, Dienstleistungen, Sonstige¹⁸, private Haushalte, Verkehr und Stromerzeugung). Exogene Inputs dieses Moduls sind die jeweiligen Wirkungsgrade der eingesetzten Energieträger, Faktoren für sonstige Umwandlungsverluste, Faktoren für Übertragungsverluste und Primärenergievorräte. Im Modul Elektrizitätserzeugung wird die gesamte Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen, Kernenergie, Wasserkraft und anderen erneuerbaren Energiequellen (d.h. Wind und Sonne) berechnet.

Der **Sektor Staat** verbucht die Staatseinnahmen und die Gesamtausgaben des Staates, die nach makroökonomischen und funktionalen Klassifikationen in verschiedene Kategorien eingeteilt werden.

Mobilitätsentwicklungen werden in iSDG im Zusammenspiel von zwei Modulen hergeleitet: Der im Infrastrukturmodul angewandte Lieferkettenansatz modelliert die bestehende Verkehrsinfrastruktur, einschließlich Neubauten, Abgänge aus dem Bestand und Reinvestitionen. Das Modul Fahrzeuge erfasst die Anzahl der Personen- und Nutzfahrzeuge und die von diesen Fahrzeugen verursachten Emissionen. Dabei werden sowohl die Bestände der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren als auch die Bestände der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge separat modelliert. Maßnahmen zur Förderung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen können durch Vorgabe eines Zielanteils an Neufahrzeugen direkt im Modell parametrisiert werden. Zur Bearbeitung dieses Projekts stand kein Modellmodul zur Abbildung von Entwicklungen des öffentlichen Verkehrs oder des Flugverkehrs zur Verfügung.

Die Modellierung des **Industriesektors** basiert auf einer erweiterten Cobb-Douglas (CD) Produktionsfunktion (Cobb & Douglas 1928). Gesamtwirtschaftliche industrielle Produktionsaktivitäten werden somit aus den eingesetzten Mengen der Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit sowie den jeweiligen Produktivitätsveränderungen dieser Produktionsfaktoren abgeleitet. Üblicherweise wird dabei in iSDG die gesamte industrielle Produktion lediglich aggregiert abgebildet. Für das gegenständliche Vorhaben wurde dieses Aggregationsniveau als nicht hinreichend identifiziert. Während der Bearbeitung des Vorhabens wurde daher der übliche Modellierungsansatz erweitert. Durch diese Entwicklungsarbeiten wurde im Vorhaben eine Modell-

¹⁸ Sonstige bezieht sich laut im Sinne der IEA-Kategorisierung (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf>) auf den Energieverbrauch von nicht spezifizierten Sektoren und beinhaltet somit den Energieverbrauch, der keinem der anderen definierten Sektoren zuzuordnen ist.

version geschaffen, welche in der Modellierung der gesamtwirtschaftlichen Produktion insgesamt sieben Sektoren unterscheidet. Diese Sektoren wurden unter Verwendung der ISIC (International Standard Industrial Classification of All Economic Activities,) Klassifikation folgendermaßen abgegrenzt:¹⁹

- 1) Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden (ISIC Section B).
- 2) Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln; Getränkeherstellung; Tabakverarbeitung (ISIC Divisions 10-12).
- 3) Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren; Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe; Herstellung von Druckerzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern (ISIC Divisions 16-18).
- 4) Herstellung von chemischen Erzeugnissen (ISIC Division 20).
- 5) Wasserversorgung, Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen (ISIC Section E);
- 6) Baugewerbe (ISIC Section F).
- 7) Sonstige Industrie (gesamte Industrie (außer Baugewerbe) abzüglich der unter 1) bis 5) aufgeführten Teilbereiche).

Das Modul **Landwirtschaft** modelliert die Produktion pflanzlicher und tierischer Erzeugnisse, die Fischereiproduktion sowie die forstwirtschaftliche Produktion.

Eine explizite **Modellierung des Gebäudebestands** wird durch iSDG traditionell nicht vorgenommen. Um die ökonomische Dynamik des Bausektors abbilden zu können, wurde daher für das gegenständliche Vorhaben ein Modul entwickelt, welches Neubau, Bestandsabgänge und Reinvestitionen des Gebäudebestands für Geschäfts- und Wohngebäude in Abhängigkeit von der Bevölkerungsentwicklung sowie dem pro-Kopf Raumbedarf modelliert. Für Bauinvestitionen können dabei die Anteile der Verwendung von Zement und Holz als Baustoffe in den jeweiligen Simulationen variiert werden. Für Wohngebäude wird die Nachfrage nach Wärmeenergie aus der Energieeffizienz des Gebäudebestands sowie exogen vorzugebenden Klimafaktoren hergeleitet.

Die Simulationen des gesamtwirtschaftlichen **Materialbedarfs** werden aus der wirtschaftlichen Entwicklung von Landwirtschaft und Industrie und dem Bedarf an fossilen Energieträgern im Energiesektor hergeleitet. Dabei beeinflussen unter anderem Vorgaben bezüglich der Verwendung herkömmlicher und alternativer Baustoffe (Holz) in der Bauwirtschaft den projizierten industriellen Materialverbrauch. Die in diesem Vorhaben durchgeführten Simulationen berichten dabei über die genutzten inländischen Extraktionen sowie den inländischen Materialkonsum (DMC). Der nationale Modellierungsansatz des iSDG-Modells ermöglicht keine fundierte Analyse von weitergehenden Fußabdruck-Indikatoren wie dem Material-Fußabdruck (RMC, Wiedmann et al. 2015).

In der deutschen Version des iSDG werden die gesamten **Treibhausgasemissionen** als CO₂-Äquivalente erfasst. In Übereinstimmung mit dem EU-Bilanzierungsschema beziehen sich die THG-Emissionen im iSDG auf die Emissionen aus fossilen Brennstoffen, aus der nicht energiebezogenen Landwirtschaft, aus der Abfallwirtschaft und aus der industriellen Produktion.

¹⁹ Weitergehende Informationen zur aktuell gültigen ISIC-Klassifikation (Revision 4) finden sich unter https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesm/seriesm_4rev4e.pdf (abgerufen am 3. April 2024).

3.1.2 Modellkalibrierung und Basisszenario

Um die Kausalstrukturen des iSDG-Modells für eine Analyse der deutschen Volkswirtschaft anwenden zu können, musste zunächst die historische Entwicklung der durch das Modell abgebildeten sozialen, ökonomischen und ökologischen Variablen in der Modelldatenbank erfasst werden. Für entsprechende Kalibrierungen des Bewertungsansatzes auf nationale Entwicklungsdynamiken greift das Millennium-Institut üblicherweise auf langjährig etablierte internationale Datenquellen zu (Datenbanken der Weltgesundheitsorganisation-WHO, Vereinten Nationen-UN, Weltbank, Welternährungsorganisation-FAO sowie der Internationalen Energieagentur-IEA).

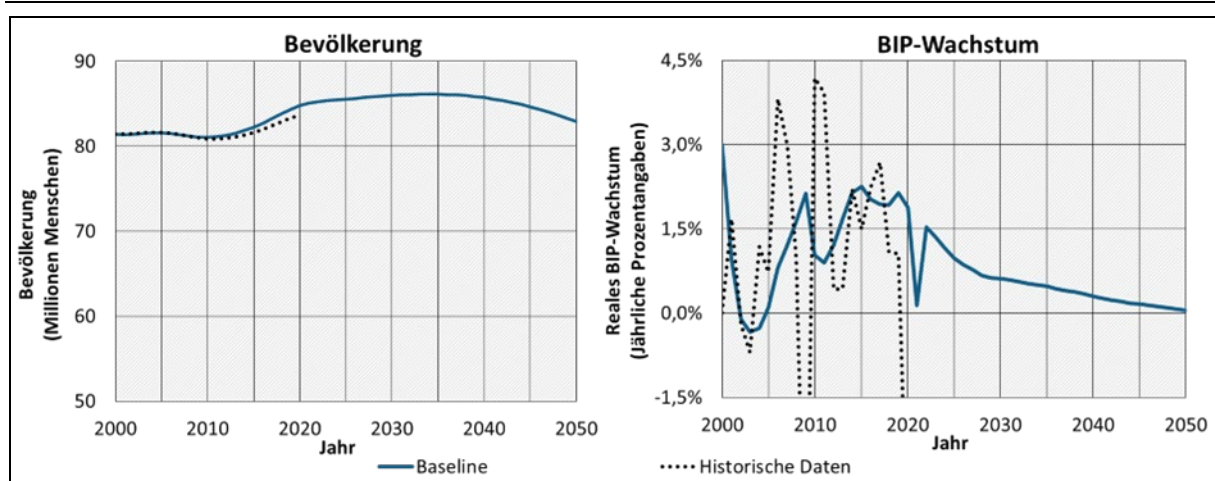
In der Anwendung für Deutschland zeigte sich allerdings, dass aus vielen der sonst genutzten Datenquellen keine hinreichend verwertbaren Daten für Deutschland entnommen werden konnten. Vor allem bei den Bildungs- und Energiedaten zeigte sich, dass historische Daten nicht wie bei vorherigen Anwendungen des iSDG-Modells aus internationalen Quellen übernommen werden konnten. Daher mussten im Vergleich zu sonstigen Anwendungen deutlich intensivere Datenerhebungen durchgeführt werden. Aufgrund der thematischen Zielsetzung des Projekts konzentrierten sich diese zusätzlichen Recherchearbeiten schwerpunktmäßig auf eine Verbesserung der Datengrundlagen für energierelevante Modellstrukturen. Einige der weiteren benötigten Daten konnten bei Eurostat sowie dem Statistischen Bundesamt abgerufen werden.²⁰ Die zur Modellerweiterung notwendigen Daten zur Gebäudestruktur in Deutschland wurden vom Statistischen Bundesamt bezogen.

Die vollständige in diesem Vorhaben verwendete Modellversion modelliert insgesamt 204 Zeitreihen für Deutschland. Die numerische Festlegung der dazu benötigten Modellparameter erfolgt unter Anwendung eines Optimierungsalgorithmus. Angesichts der aus den wechselseitigen Abhängigkeiten der jeweiligen Module resultierenden Komplexität dieser Optimierungsaufgabe, werden hierzu heuristische Optimierungsroutinen angewandt. Die technische Modellierungsumgebung stellt hierzu einen Parametrisierungsalgorithmus zur Verfügung, welcher die Prinzipien des Differential Evolution Ansatzes (Price, Storn & Lampinen 2005) nutzt.

Ohne zusätzliche Szenarioannahmen erzeugt eine Anwendung des vollständig kalibrierten und validierten iSDG-Modells die Ergebnisse des Basisszenarios. Diese Baselineprojektion schreibt historisch beobachtete Entwicklungsdynamiken in die Zukunft fort. Auswirkungen politischer Maßnahmen, welche erst kürzlich eingeführt wurden oder aber erst für die Zukunft geplant sind, werden daher in der Baseline nicht berücksichtigt. Die Basissimulation des gegenständigen Vorhabens kennzeichnet eine langfristig stagnierende Bevölkerungsdynamik wie auch eine langfristig stagnierende wirtschaftliche Aktivität (Abbildung 2).

²⁰ Die genauen Quellen sind im Datenblatt des iSDG Deutschland Modells zu finden und können so wie das Modell bei Bedarf angefragt werden.

Abbildung 2: Projektion des iSDG-Modells für die Gesamtbevölkerung und das BIP-Wachstum in Deutschland



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 3 zeigt eine Zusammenfassung der in der Baselineprojektion simulierten SDG-Indikatorentwicklungen. Für diese Darstellung wurde für die einzelnen SDGs jeweils das arithmetische Mittel der Zielerreichungsgrade der im Modell zu den einzelnen SDGs abgebildeten SDG-Indikatoren berechnet. Aktuelle Befunde für das Berichtsjahr 2022 werden dabei durch grüne Balken visualisiert.

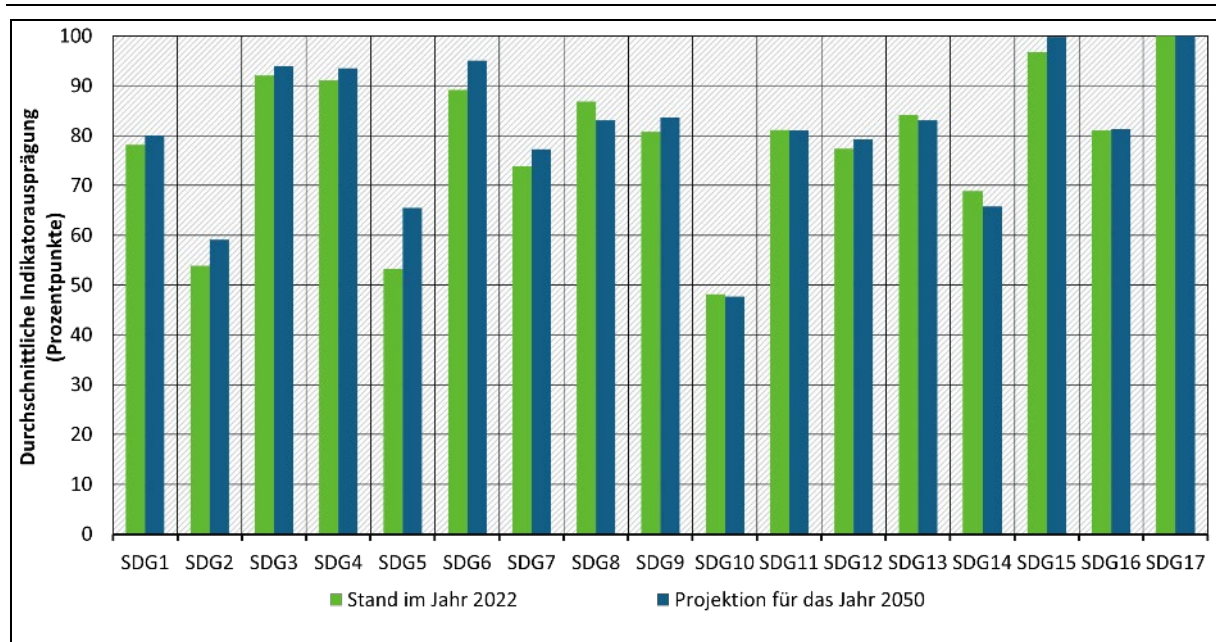
Der resultierende grafische Befund verdeutlicht, dass die durch das Modell abgebildeten Indikatoren in Deutschland bereits heute hohe Werte erreichen (Mittelwert: 78 %). Insbesondere für SDG 3 (Gesundheit und Wohlergehen), SDG 4 (hochwertige Bildung), SDG 6 (sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen) und SDG 17 (Partnerschaften zur Erreichung der Ziele) wird bereits gegenwärtig eine (annähernd) vollständige Zielerreichung ausgewiesen. Die niedrigsten Zielerreichungsgrade werden für das Jahr 2022 für folgende SDGs ausgewiesen: SDG 2 (kein Hunger), SDG 5 (Geschlechtergleichheit), SDG 10 (weniger Ungleichheiten). SDG 10 ist dabei das einzige SDG, dessen durchschnittlicher Zielerreichungsgrad unterhalb von 50 % verbleibt.²¹

Diesen gegenwärtigen Befunden werden in der Abbildung durch die blauen Balken die jeweiligen Baselineprojektionen des Jahres 2050 gegenübergestellt. Dieser Vergleich der Zielerreichungsgrade des Jahres 2022 mit jenen des Jahres 2050 zeigt, dass die gegenwärtig vorherrschenden Entwicklungstrends langfristig zumeist auf eine im Zeitablauf ansteigende Zielerreichung hinwirken.

Deutliche Verbesserungen (12 % Anstieg von 2022 bis 2050) werden dabei für SDG 5 (Geschlechtergleichheit) projiziert. Diese Entwicklung ist auf die Weiterführung der Bildung für alle Geschlechter zurückzuführen. Auch unter SDG 2 (kein Hunger) ist eine deutliche Verbesserung des Zielerreichungsgrads zu erkennen. Der fünfprozentige Anstieg von 2022 bis 2050 ist vor allem auf eine Steigerung des Anteils nachhaltig bewirtschafteter landwirtschaftlicher Anbauflächen zurückzuführen. Dieser Anteil steigt in der Baselineprojektion bis zum Jahr 2050 auf 35 %.

²¹ Die zu SDG 10 durch das Modell abgebildeten Indikatoren sind „Growth rates of household expenditure or income per capita among the bottom 40 per cent of the population and the total population“; „Proportion of people living below 50 per cent of median income, by sex, age and persons with disabilities“; „Redistributive impact of fiscal policy“ sowie „Labour share of GDP“.

Abbildung 3: SDG-Zielerreichungsgrade in Deutschland (Status quo und Baselineprojektion für 2050)



Quelle: Eigene Berechnungen

Unter Fortschreibung des Status quo werden allerdings auch langfristig stagnierende, bzw. gering rückläufige Entwicklungen für folgende SDGs projiziert:

- ▶ SDG 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum),
- ▶ SDG 10 (weniger Ungleichheiten),
- ▶ SDG 11 (nachhaltige Städte und Gemeinden),
- ▶ SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz),
- ▶ SDG 14 (Leben unter Wasser),
- ▶ SDG 16 (Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen),
- ▶ SDG 17 (Partnerschaften zur Erreichung der Ziele).

Die Entwicklungen unter SDG 8 sind dabei insbesondere darauf zurückzuführen, dass das Wirtschaftswachstum aufgrund des in der Baseline projizierten demografischen Wandels langfristig stagniert. Insbesondere der Dienstleistungssektor wächst in der Baselineprojektion langsamer als in der Vergangenheit. Weitergehende Erläuterungen zu den hier angesprochenen Entwicklungen können im englischsprachigen Abschlussbericht nachgelesen werden.

Eine detailliertere Gegenüberstellung von Befunden der Baselineprojektion mit Ergebnissen alternativer Maßnahmensimulationen erfolgt später in Abschnitt 3.3. Zuvor werden die in den jeweiligen Alternativsimulationen unterstellten Maßnahmen im folgenden Unterkapitel inhaltlich kurz zusammengefasst.

3.2 Zusammenfassung der modellierten Alternativszenarien

Um potenzielle Synergien und Hemmnisse zwischen klima- und ressourcenpolitischen Transformationsmaßnahmen und weiteren SDG-Zielsetzungen identifizieren zu können, wurden weitreichende alternative Szenarioparametrisierungen vorgenommen. Die jeweiligen Szenarioparametrisierungen orientieren sich, für zentrale Handlungsfelder der RESCUE Studie, an den jeweils im Green Supreme Szenario unterstellten Umstellungen. Die Umsetzung dieser Szenarioparametrisierungen in den iSDG-Modellstrukturen wird nachfolgend dokumentiert.

3.2.1 Industrielle Produktion (inklusive Abfall und Abwasser)

Das Industrie-Szenario kombiniert energie- und kreislaufwirtschaftliche Maßnahmen zur Reduktion von Rohstoffinanspruchnahme und Emissionen in den durch das Modell abgebildeten Industriesektoren. Für die nicht-energiespezifischen Emissionen der industriellen Produktion wird dabei eine langfristige Halbierung der Emissionsintensität simuliert.

Bezüglich der industriellen Energienachfrage wird in Übereinstimmung mit dem Emissionsminderungsziel der Bundesregierung langfristig die direkte oder indirekte Verwendung von erneuerbarem Strom bzw. die vollständige Substitution fossiler Energieträger und Rohstoffe unterstellt. Effekte der Kreislaufwirtschaft werden als Effizienzsteigerungen des industriellen Material- und Wasserverbrauchs abgebildet. Aus der RESCUE-Studie lagen keine detaillierten Kostenannahmen vor, welche in iSDG zur Berücksichtigung der hierfür zusätzlich benötigten Investitionsausgaben hätten parametrisiert werden können. Um die aus dieser Untererfassung notwendiger Transformationskosten in den Modellrechnungen resultierenden Simulationseigenschaften abzuschätzen, werden im vollständigen Abschlussbericht auch Ergebnisse einer entsprechenden Sensitivitätsstudie vorgestellt. Aus den parametrisierten Effizienzsteigerungen resultieren direkte Wertschöpfungseffekte. Aufgrund dieser Wertschöpfungseffekte steigt die Industrieproduktion im Vergleich zur Baseline deutlich an.

3.2.2 Mobilität

Für das Handlungsfeld Mobilität wird in der Alternativsimulation unterstellt, dass der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge an sämtlichen Fahrzeugneuzulassungen (Personen- und Nutzfahrzeuge) bis zum Jahr 2050 stetig auf 100 % ansteigt. Aus dieser Annahme resultiert im Verkehrsmodul des iSDG-Modells ein langfristiger Rückgang von Kraftstoffverbrauch und zugehörigen verkehrsbedingten Emissionen. Die Parametrisierung dieser Annahme beruht auf der Festlegung des Zielwerts für den Anteil der Elektrofahrzeuge an den Neuzulassungen. Es erfolgt also keine weitergehende Analyse der gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen individueller Maßnahmen (wie bspw. Kaufprämien für elektrisch betriebene Fahrzeuge, staatliche Investitionsprogramme zur Förderung der Ladeinfrastruktur, etc.).

Zudem wird die in der RESCUE-Studie angenommene Veränderung der Aufteilung des Individualverkehrs auf einzelne Verkehrsträger durch eine unterstellte Veränderung des Fahrzeugbestands parametrisiert: Annahmegemäß wird der Personenfahrzeugbestand pro Kopf bis zum Jahr 2050 im Vergleich zur Baseline um 11 % reduziert. Obwohl Schieneninfrastruktur ausgebaut wird, gibt es keine Verknüpfung zwischen der wachsenden Infrastruktur und dem individuellen Verkehrsverhalten.

3.2.3 Landwirtschaft und Landnutzung

Im Handlungsfeld Landwirtschaft und Landnutzung wurden zwei grundlegende Umstellungen parametrisiert: Eine Reduktion der Produktion tierischer Erzeugnisse bei gleichzeitiger Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Anbaumethoden.²²

Die parametrisierte Reduktion der Produktion tierischer Erzeugnisse dient dazu, die angebotsseitigen Effekte der in der RESCUE-Studie unterstellten Verringerung des Fleischkonsums abzubilden. In der Simulation wird dabei exogen vorgegeben, dass die Produktion tierischer Erzeugnisse in Tonnen pro Hektar zwischen 2020 und 2050 halbiert wird. Unter der ergänzenden Annahme, dass diese Reduktion des Angebots nicht durch zusätzliche Fleischimporte substituiert wird, resultiert hieraus in der Simulation eine langfristige Annäherung des gesellschaftlichen Fleischkonsums an durchschnittlich empfohlene Tagesmengen.²³

Gleichzeitig wird angenommen, dass zur Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft bis zum Jahr 2050 jährlich zusätzliche staatliche Mittel in Höhe von 0,05 % des BIP bereitgestellt werden. Bezogen auf historische Referenzwerte des Jahres 2020 entspricht dies einer zusätzlichen jährlichen Förderung der Landwirtschaft in einer Größenordnung von 1,7 Mrd €. Im Modell wird durch diese staatliche Förderung eine Erhöhung des Anteils der nachhaltig bewirtschafteten landwirtschaftlichen Flächen ausgelöst. Drei zentrale Wirkungskanäle werden dadurch aktiviert:

- 1) die Stickstoffbilanz des Bodens wird wiederhergestellt und aufrechterhalten,
- 2) die nicht-energiespezifischen Emissionen aus dem Landwirtschaftssektor werden stärker reduziert,
- 3) die Beschäftigung in der Landwirtschaft entwickelt sich im Vergleich zur historischen Entwicklung stabiler (da der Bedarf an Arbeitskräften in der nachhaltigen Landwirtschaft im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft größer ist).

3.2.4 Bauen und Wohnen

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnt, wird der Gebäudebestand durch iSDG üblicherweise nicht explizit abgebildet. Nachdem im Rahmen des gegenständigen Vorhabens erstmals ein entsprechendes Modul zur Modellierung des Gebäudebestands entwickelt wurde, konnten für das Handlungsfeld Bauen und Wohnen allerdings folgende Annahmen parametrisiert werden:

- 1) Öffentliche Investitionen zur Steigerung von Stromeffizienz im Gebäudebestand, sowie ein Anstieg der Sanierungsrate um 2,7 %.
- 2) Abschwächung von Aktivitäten zur Gebäudebestandserweiterung, indem eine niedrigere Elastizität zwischen Einkommen und Bautätigkeit unterstellt wird.
- 3) Substitution mineralischer Baustoffe durch nachwachsende Baustoffe: Für Neubau wie auch Renovierung von Gebäuden wird unterstellt, dass vermehrt Holz anstelle von traditionellen Baumaterialien (Zement, metallische und nicht metallische Mineralien) verwendet wird. Dabei liegt der Zielwert für Holz für den gesamten Bausektor bei 30%. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die gegenwärtig vorliegende iSDG-Modellversion noch nicht die Rückwirkungen einer gesteigerten Nutzung

²² Nachhaltige Landwirtschaft wird im iSDG-Modell eher allgemein parametrisiert (Anbaumethoden, welche stickstoffbindende Pflanzen als Düngemittel verwenden). Dabei wird im Vergleich zu konventionellen Anbaumethoden generell eine höhere Arbeitsintensität modelliert. Weitere spezifische Aspekte nachhaltiger Anbaumethoden, wie sie beispielsweise durch verschiedene Ökolabels definiert werden, werden durch das Modell nicht explizit abgebildet.

²³ Zu entsprechenden Ernährungsempfehlungen siehe bspw.: <https://www.dge.de/presse/meldungen/2024/gut-essen-und-trinken-dge-stellt-neue-lebensmittelbezogene-ernaehrungsempfehlungen-fuer-deutschland-vor/> (abgerufen am 26. Juni 2024).

biotischer Materialien im Handlungsfeld Bauen und Wohnen auf die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach biotischen Materialien abbildet.

3.2.5 Energieversorgung

In Ergänzung zu den zuvor bereits in einzelnen Handlungsfeldern (Industrielle Produktion, Mobilität, Landwirtschaft und Landnutzung, Bauen und Wohnen) direkt parametrisierten sektoralen klimapolitischen Annahmen, erlauben die iSDG-Strukturen weitergehende klimapolitische Parametrisierungen zur Berücksichtigung von Umstellungen in den Bereichen Energienachfrage und Energieversorgung. In den Politiksimulationen wurden diesbezüglich drei wesentliche Alternativannahmen unterstellt:

- 1) **Elektrizitätserzeugung:** Im Alternativszenario wird der vollständige Ausstieg aus der Kernenergie berücksichtigt. Ab dem Jahr 2030 erfolgt zudem kein weiterer Einsatz der fossilen Energieträger Kohle und Öl in der Elektrizitätserzeugung. Im Bereich der Kohlekraftwerke geschieht dies in den Simulationen zwischen den Jahren 2022 und 2030 durch eine Stilllegung von durchschnittlich 5 GW Kapazitäten pro Jahr. Bei Öl geschieht dies durch die Stilllegung von durchschnittlich 0,6 GW Kapazität pro Jahr von 2022 bis 2030. Es wird angenommen, dass fossiles Gas langfristig durch nicht-fossiles Gas ersetzt wird. Daher werden im Jahr 2050 weiterhin 277,2 PJ Gas verwendet. Eine explizite Modellierung entsprechender Umstellungen der Gasversorgung wird in den Simulationen nicht vorgenommen.

Diese Entwicklungen gehen einher mit ambitionierten öffentlichen Investitionen in erneuerbare Energiekapazitäten (Wind- und Solarenergie). Im Vergleich zum Basis-szenario werden bis zum Jahr 2030 jährlich durchschnittlich 6,6 GW Wind- und 7,5 GW Solarkapazität neu errichtet. Danach, von 2030 bis 2050, werden jedes Jahr weitere 4,5 GW Wind- und 5 GW Solarenergie-Kapazitäten zugebaut. Im Jahr 2030 stammen dann 80 % und, im Jahr 2050 88 % des nachgefragten Stroms aus erneuerbaren Quellen.

- 2) **Dekarbonisierung weiterer Sektoren:** Neben den zuvor bereits vorgestellten Simulationsannahmen in ausgewählten Handlungsfeldern wird für alle übrigen gesamtwirtschaftlichen Energienachfragen eine langfristige Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energieträger unterstellt. Die hier unterstellten Transformationen vollziehen sich allerdings über einen längeren Zeitraum als die zuvor angesprochenen Umstellungen in der Elektrizitätserzeugung (bis zum Ende des Simulationszeitraums).
- 3) **CO₂-Steuer:** Die Szenarioparametrisierungen zur Simulation der Nachfrageeffekte einer CO₂-Steuer unterstellen einen langfristig ansteigenden Kohlenstoffpreis. Angenommen wird, dass dieser Preis, ausgehend von einem Niveau von 30 € je Tonne CO₂ im Startjahr der Simulationen (2022), bis zum Jahr 2030 auf 400 € ansteigt. Bis zum Jahr 2050 wird ein Kohlenstoffpreis von 500 € je Tonne CO₂ erreicht, um die Auswirkungen im Modell zu testen.

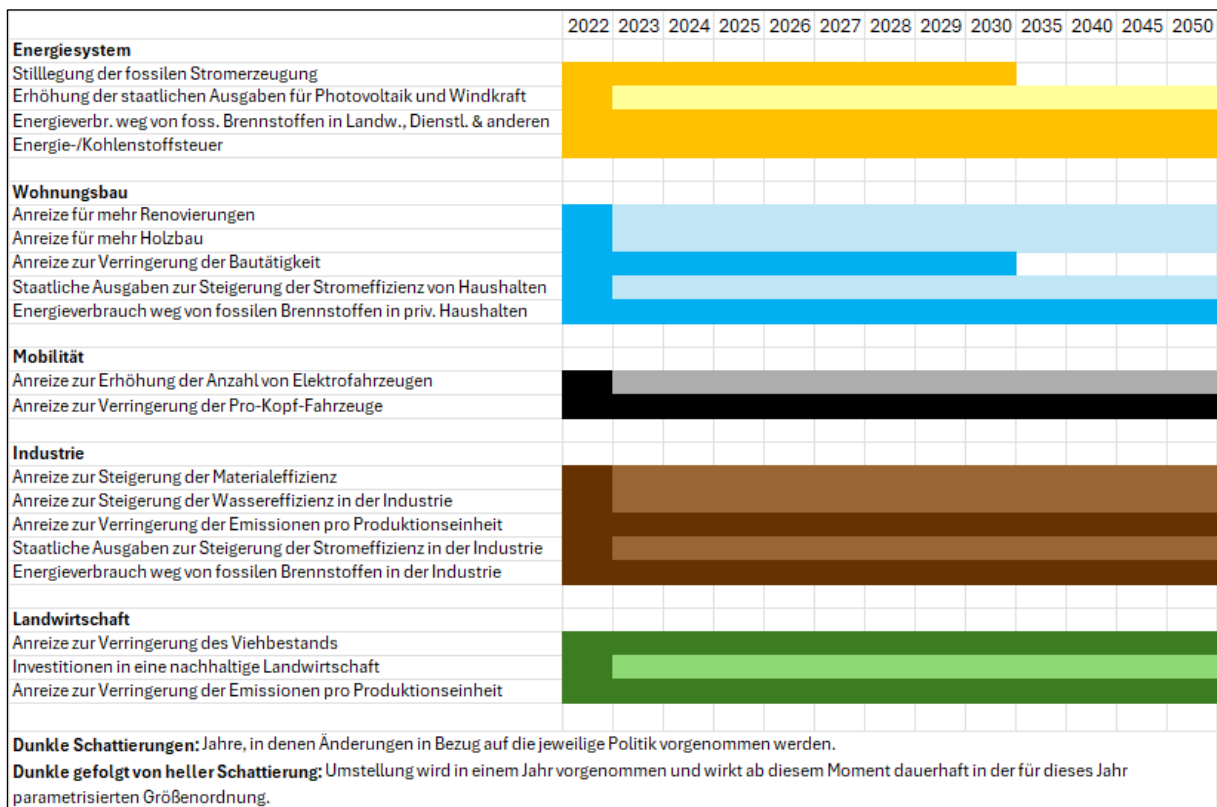
Da haushalterische Aspekte der Besteuerung (Mittelaufkommen und Verwendung) in den Simulationen nicht weiter betrachtet werden, bleibt es zukünftigen Vorhaben vorbehalten, bspw. die Auswirkungen der Einführung einer Kompensation in Form eines Klimageldes in weiterführenden Szenarioparametrisierungen zu analysieren.

3.2.6 Politische Maßnahmen

Während die zuvor beschriebenen Szenarioparametrisierungen jeweils zunächst je Handlungsfeld implementiert und evaluiert wurden, wurde abschließend auch ein gemeinsames Politik-szenario simuliert. In diesem Alternativszenario wird eine gemeinsame Umsetzung sämtlicher unter den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.5 aufgeführten Transformationsannahmen unterstellt.

Der in den Alternativsimulationen unterstellte zeitliche Ablauf der Umstellungen wird in Abbildung 4 zusammengefasst. Dunkle Schattierungen stehen für Jahre, in denen Änderungen in Bezug auf die jeweilige Politik vorgenommen werden. Wenn auf eine dunkle Farbe eine helle folgt, bedeutet dies, dass eine Umstellung in einem Jahr vorgenommen wird und ab diesem Moment dauerhaft in der für dieses Jahr parametrisierten Größenordnung wirkt.

Abbildung 4: Zeitplan für die politischen Maßnahmen in den Szenarien



Quelle: Eigene Berechnungen

3.3 Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse für Deutschland

3.3.1 Zentrale Simulationsergebnisse

3.3.1.1 Kernergebnisse

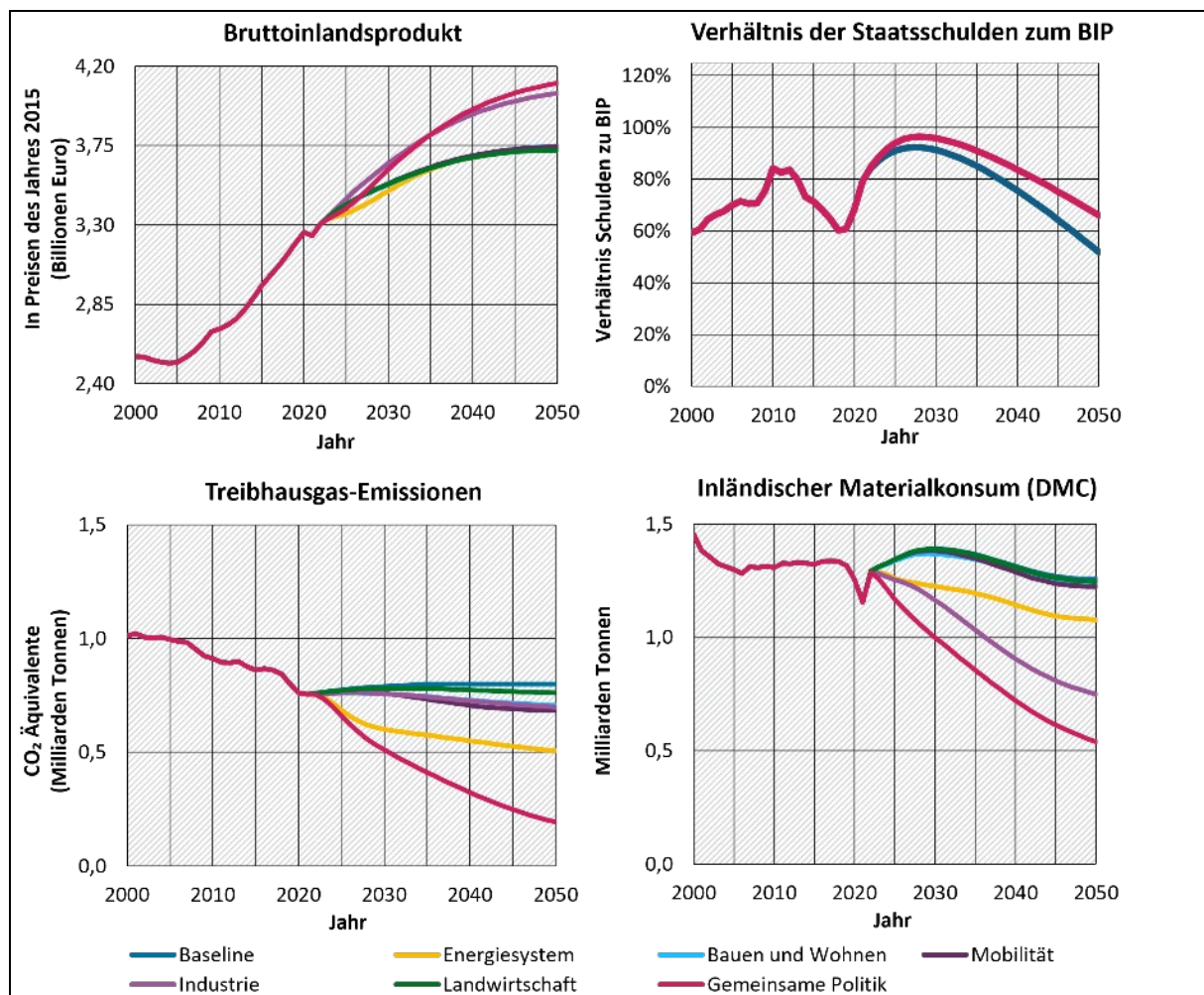
Eine grafische Zusammenfassung wesentlicher Befunde der Modellsimulationen wird in Abbildung 5 gezeigt. Für den Zeitraum 2000 bis 2050 werden die für Deutschland simulierten Entwicklungen des Bruttoinlandsprodukts (linke obere Grafik), des öffentlichen Schuldenstands in Relation zum Bruttoinlandsprodukt (rechte obere Grafik), des inländischen Rohstoffkonsums (DMC), rechte untere Grafik) sowie sämtlicher inländischer Treibhausgasemissionen gezeigt. Die in der Baselineprojektion simulierten Werte werden dabei jeweils durch eine dunkelblaue Linie dargestellt, die Befunde der gemeinsamen Politiksimulation werden durch eine rote Linie repräsentiert.

Zur Erleichterung der Interpretation der hier gezeigten und im folgenden Abschnitt näher im Detail erläuterten Befunde weisen wir zunächst auf folgende Punkte hin: Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erwähnt wurde, projiziert die Baselinesimulation lediglich historisch beobachtete Entwicklungsdynamiken in die Zukunft. Es handelt sich hier also nicht um ein „Mit Maßnahmen Szenario“, welches bereits die Effekte von für die Zukunft politisch vereinbarten Maßnahmen (wie beispielsweise dem vollständigen Kohleausstieg) in seinen Bewertungen mit berücksichtigen würde. Diesem Baseline-Szenario ohne weitere zukünftige Umstellungen wurde von uns ein klima- und ressourcenpolitisches Politikscenario („gemeinsame Politik“-Szenario) gegenübergestellt, welches die Auswirkungen von weitreichenden Umstellungen in unterschiedlichen Handlungsfeldern berücksichtigt. In der Gegenüberstellung dieser beiden Szenarien ist erkennbar, dass **das klima- und ressourcenpolitische Politikscenario einen deutlichen „green growth“ Charakter aufweist:**

- 1) Im Jahr 2050 wird im klima- und ressourcenpolitischen Politikscenario ein um 9,6 % im Vergleich zur Baseline gesteigertes Bruttoinlandsprodukt für Deutschland simuliert.**
- 2) Trotz dieser gesteigerten Wirtschaftsaktivität, wird im Jahr 2050 gleichzeitig im Vergleich zur Baseline ein Rückgang des inländischen Materialverbrauchs um 40 % simuliert.**
- 3) Die im klima- und ressourcenpolitischen Politikscenario simulierte Entwicklung der inländischen Treibhausgasemissionen ist dabei im Einklang mit den Vorgaben zur Einhaltung des 2°C-Ziels: Im Vergleich zum Basisjahr 1990 werden in diesem Szenario die deutschen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 84 % reduziert.**

Nähere Details zu den in dieser Abbildung ebenfalls ausgewiesenen Wirkungen der in einzelnen Handlungsfelder parametrisierten Umstellungen werden untenstehend im Abschnitt 3.3.2 erläutert.

Abbildung 5: Entwicklung von Bruttoinlandsprodukt, Staatsschuld, inländischem Rohstoffkonsum und inländischen Treibhausgasemissionen in den Simulationen



Quelle: Eigene Berechnungen

Zur Bewertung dieser Teilwirkungen wurden zusätzliche Simulationsläufe parametrisiert, welche in Ergänzung zu den Parametrisierungen der Baseline lediglich die zusätzlichen Effekte einzelner ausgewählter Umstellungen berücksichtigen (wie bspw. der in der Abbildung unter der Bezeichnung „Energiesystem“ ausgewiesenen Effekte einer Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energieträger bei gleichzeitig langfristig intensivierter CO₂-Besteuerung). Die in der Abbildung gewählten Bezeichnungen dieser ergänzenden Teilsimulationen (Energiesystem, Bauen und Wohnen, Mobilität, Industrie, Landwirtschaft) orientieren sich an den dabei jeweils vorwiegend variierten Modellmodulen.²⁴

Zuvor sei hier aber noch explizit darauf eingegangen, dass die soeben benannten, wirtschaftlich und ökologisch positiven, Entwicklungen nicht wie „Manna vom Himmel“ fallen: In den Simulationen wurde für sämtliche zusätzliche Investitionen unterstellt, dass diese staatlich finanziert werden. Die im oberen rechten Bereich der Abbildung gezeigte Entwicklung der Staatsverschuldung im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt ist daher der geeignete Gesamtindikator zu Bewertung der in diesen Simulationen insgesamt unterstellten Transformationskosten. Zu erkennen ist, dass die Vorgaben des Maastricht-Vertrags (welche den maximalen

²⁴ Dieser Hinweis scheint insbesondere für die Interpretation der Befunde der „Bauen und Wohnen“-Simulation von Bedeutung: Anhand der gegebenen Modellstrukturen konnten Auswirkungen von Veränderungen der Materialintensität im Bausektor nicht in der mit „Bauen und Wohnen“ betitelten Teilsimulation berücksichtigt werden. Diese Effekte wurden stattdessen (neben weiteren Veränderungen von Materialintensitäten in übrigen Sektoren) in der Teilsimulation „Industrie“ bewertet.

Schuldenstand eines Mitgliedstaates auf 60 Prozent des Bruttoinlandsprodukts begrenzen) im Baselineszenario langfristig eingehalten werden. Trotz langfristig rückläufiger Verhältnisse wird im Politikscenario hingegen für das Jahr 2050 noch eine Staatsverschuldung in Höhe von ungefähr 66 % des Bruttoinlandsprodukts projiziert.

Wir weisen dabei ausdrücklich darauf hin, dass wir bei dieser erstmaligen Anwendung des iSDG-Modells für Deutschland nicht darauf abzielten, sämtliche bis zum Jahr 2050 zu erwartenden Investitionskosten eigenständig abzuschätzen. Auch aus der RESCUE-Studie konnten diesbezüglich keine direkt für entsprechende Modellparametrisierungen nutzbare Informationen ableiten. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich der in den Politiksimulationen im Vergleich zur Baseline projizierte Anstieg der Staatsverschuldung in zukünftigen Anwendungen aufgrund bislang unberücksichtigter Investitionsnotwendigkeiten als zu zurückhaltend erweist.

Während diese Einschränkung nicht im Widerspruch zur Zielsetzung des gegenständigen Vorhabens steht, kann aus der hier angesprochenen Entwicklung eine weitere zentrale qualitative Kernbotschaft der iSDG-Anwendung für die deutsche Politik hergeleitet werden: **Die Simulationsergebnisse des ambitionierten Politikscenarios verdeutlichen, dass eine umfassende klima- und ressourcenpolitische Transformation der deutschen Volkswirtschaft unter der Vorgabe einer dauerhaften Einhaltung der fiskalpolitischen Vorgaben des Maastricht-Vertrags unrealistisch erscheint.**

3.3.1.2 SDG-Entwicklungen im kombinierten Politikscenario im Vergleich zum Basisszenario

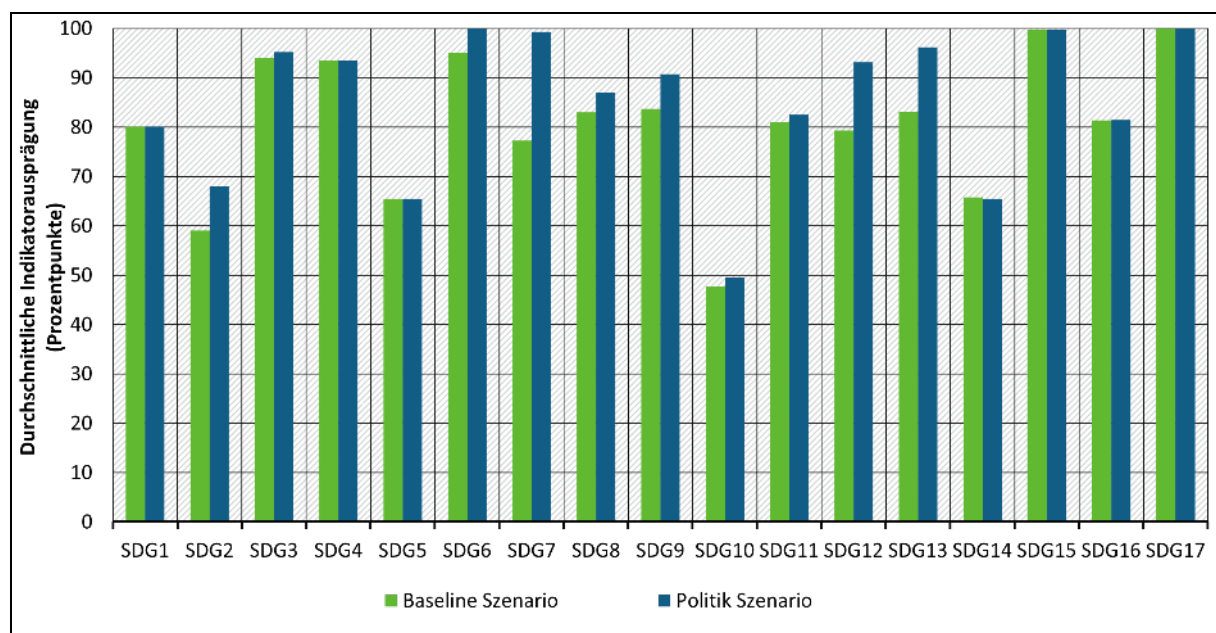
Der Vergleich der Politiksimulation mit den entsprechenden Befunden der Baselinesimulation identifiziert **keine Anzeichen auf negative Auswirkungen klima- und ressourcenpolitischer Transformationsentwicklungen auf SDG-Zielerreichungen in Deutschland** (siehe hierzu Abbildung 6). Sichtbare **Verbesserungen der SDG-Zielerreichung werden in der Politiksimulation für folgende SDGs projiziert:**

- ▶ SDG 2 (kein Hunger),
- ▶ SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie),
- ▶ SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur),
- ▶ SDG 12 (nachhaltige/r Konsum und Produktion),
- ▶ SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz).

Die aggregierte Entwicklung im Hinblick auf die Zielerreichung unter SDG 2 wird wesentlich durch die Erhöhung des Anteils nachhaltig bewirtschafteter landwirtschaftlicher Flächen gefördert. Der im Politikscenario im Vergleich zur Baseline steigende Anteil der nachhaltig bewirtschafteten Anbauflächen bewirkt in den Modellsimulationen insbesondere einen Rückgang der nichtenergiebedingten landwirtschaftlichen Emissionen sowie eine Wiederherstellung des Nährstoffhaushalts der Böden.

Die klimapolitischen Annahmen des Politikscenarios haben direkte Auswirkungen auf die Indikatorentwicklungen unter SDG 7, SDG 9 und SDG 13. Insbesondere die im Handlungsfeld Energieversorgung unterstellte vollständige Dekarbonisierung der Elektrizitätswirtschaft wie auch sämtlicher übriger Wirtschaftssektoren (mit Ausnahme der Industrie) treiben diese Entwicklungen voran.

Abbildung 6: SDG Zielerreichungen (Mittelwerte der jeweiligen Indikatoren) im Jahr 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Steigerungen der Zielerreichung im Vergleich zur Baseline unter SDG 9 sind vorrangig auf die Parametrisierungen des Industrie-Szenarios zurückzuführen. Bis zum Jahr 2050 wird hier insgesamt eine zusätzliche Steigerung der Materialeffizienz um nahezu 25 % angenommen. Die dadurch unmittelbar ausgelösten Produktivitätsfortschritte bewirken einen Anstieg der industriellen Produktion, welcher maßgeblich ist für die in der Politiksimulation beobachtbare Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Aktivität. Dieser Effekt wird in der Politiksimulation zudem durch einen Terms of Trade Effekt verstärkt: Der schrittweise Ausstieg aus fossilen Brennstoffen führt zu einer Verringerung der Abhängigkeit von ausländischen Energieimporten. Dies verbessert in den entsprechenden Modellrechnungen die Entwicklung der Handelsbilanz, was sich wiederum positiv auf die Gesamtfaktorproduktivität auswirkt.

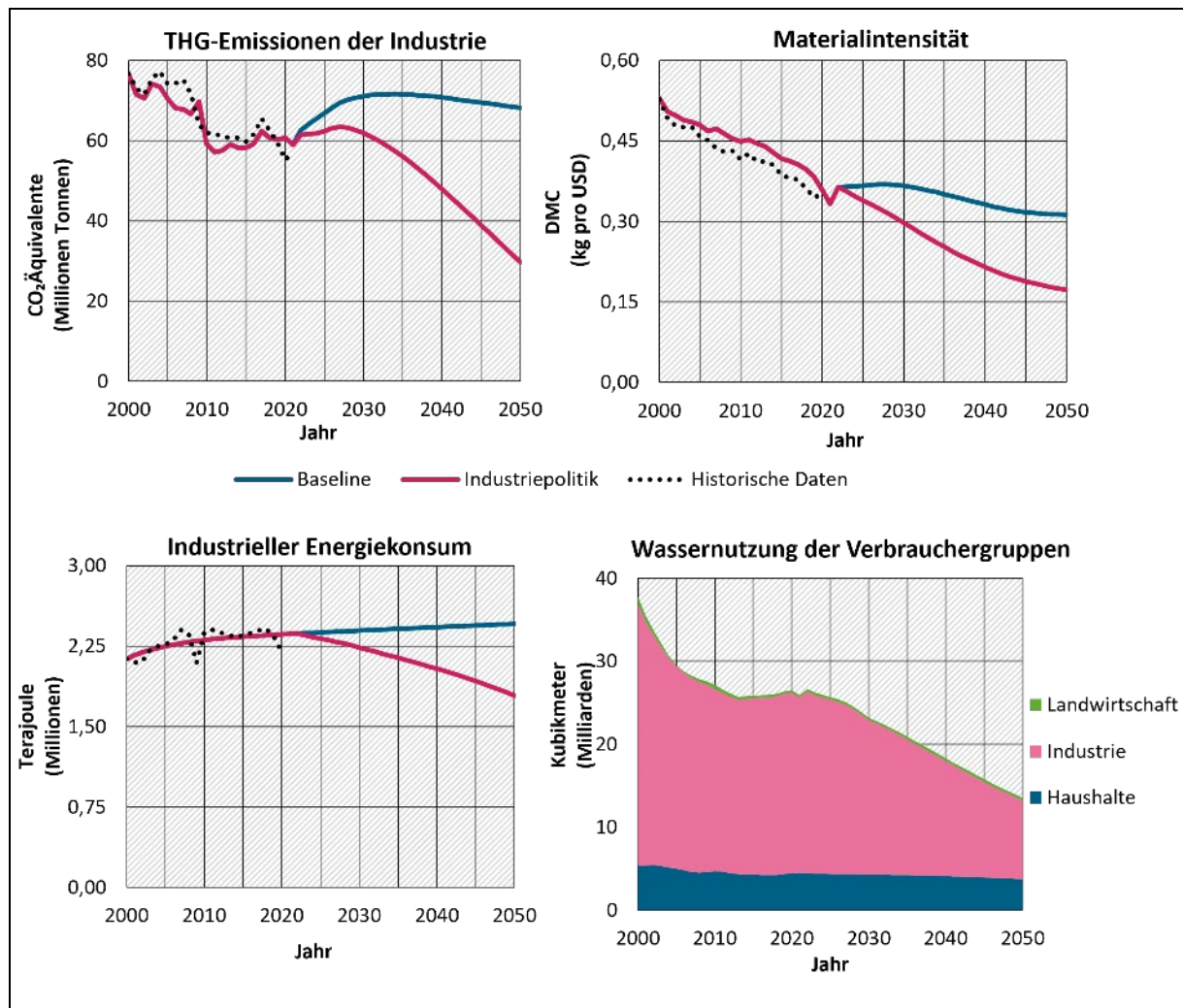
Die positiven Entwicklungen im Hinblick auf SDG 12 spiegeln die bereits zuvor angesprochene deutliche Reduktion des inländischen Rohstoffkonsums (DMC) im Politikszenario wider. Dieser wird in iSDG als Summe des Verbrauchs fossiler Brennstoffe sowie der Inanspruchnahme von Metallerzen, Biomasse sowie Bau- und anderer (im Modell aufgrund der Entwicklung der einzelnen Module projizierten) Materialien berechnet. In der gemeinsamen Politiksimulation prägen dabei die zentralen Simulationsannahmen für die Handlungsfelder Energieversorgung, Bauen und Wohnen und Mobilität den drastischen Rückgang des Konsums fossiler Brennstoffe. Weitere Maßnahmenpakete der Handlungsfelder Bauen und Wohnen sowie Industrie führen zudem dazu, dass in der gemeinsamen Politiksimulation der Konsum nichtmetallischer Mineralien ebenfalls im Vergleich zur Baselinesimulation reduziert wird.

3.3.2 Detailanmerkungen zu individuellen Simulationsergebnissen

3.3.2.1 Industrielle Produktion

Im Industrieszenario werden Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz, zur Erhöhung der industriellen Produktivität, zur Verringerung nichtenergetischer Industrieemissionen, zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Verlagerung des industriellen Energieverbrauchs auf erneuerbare Energieträger modelliert. Diese Maßnahmen haben direkte Auswirkungen auf den inländischen Materialeinsatz, die Wasserentnahme, den Energieverbrauch und die Emissionen. Die Analyse der Wirkungen dieser Maßnahmen konzentriert sich auf die SDGs 6, 7 und 12.

Abbildung 7: Detailentwicklungen im Industrie-Szenario



Quelle: Eigene Berechnungen

Unter SDG 6 wird in dieser Simulation für die durch das Modell abgebildeten Indikatoren eine 100%-ige Zielerreichung erreicht. Diese Entwicklung ist in erster Linie auf erhebliche Verbesserungen des Indikators SDi 6.4.1 - Wassernutzungseffizienz - zurückzuführen.²⁵ Durch die Umsetzung eines Kreislaufwirtschaftskonzepts in den Industriesektoren wird die Wasserent-

²⁵ Als SDi werden in diesem Text die durch das Modell abgebildeten Nachhaltigkeitsindikatoren bezeichnet. Die konkrete Nummerierung dieser Indikatoren orientiert sich am *global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development* der Vereinten Nationen (<https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list>, abgerufen am 26. Juni 2024).

nahme bei steigender Wertschöpfung erheblich reduziert. Daraus resultiert insgesamt (von 2022-2050) eine Steigerung der Wassernutzungseffizienz um 30 %

Unter SDG 12 wird für die durch das Modell abgebildeten Indikatoren eine 90%-ige Zielerreichung simuliert. Der Indikator 12.2.2 - inländischer Materialverbrauch wird dabei im Vergleich zur Baseline um 30 % reduziert. Diese Reduktionen betreffen insbesondere die Nachfrage nach nichtmetallischen Mineralien.

3.3.2.2 Mobilität

Abbildung 8 verdeutlicht, dass im Handlungsfeld Mobilität eine langfristige Elektrifizierung des Fahrzeugbestands bei gleichzeitiger Dämpfung des Wachstums des Individualverkehrs unterstellt wird. Im kombinierten Politikscenario leisten diese Umstellungen relevante Beiträge zu der bereits aus Abbildung 6 bekannten positiven Entwicklung bei Umsetzung der SDGs 7, 9 und 13 in Deutschland. Wichtig ist es zu beachten, dass die im kombinierten Politikscenario simulierten positiven Effekte der Elektrifizierung des Fahrzeugbestandes nur bei dem gleichzeitig (im Handlungsfeld Energieversorgung) unterstellten umfassenden Ausbau der Kapazitäten erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung realisiert werden können. Zur Einordnung dieses Effekts zeigt Abbildung 9 die Entwicklung von Kraftstoffnachfrage und Treibhausgasemissionen in Deutschland in einer Simulation, welche im Vergleich zur Baseline zusätzlich lediglich die für das Handlungsfeld Mobilität unterstellten Umsetzungen berücksichtigt.

In dem so simulierten Mobilitätsszenario steigen die im Modell abgebildeten Indikatoren zur Beurteilung der Umsetzung von SDG 7 in Deutschland bis zum Jahr 2050 lediglich auf durchschnittlich 83 % an. Im Vergleich zur Baselineentwicklung (77 % im Jahr 2050) wird somit in Abwesenheit der im Handlungsfeld Energieversorgung simulierten Umstellungen eine deutlich geringere Verbesserung erreicht. Die modellierten Verbesserungen sind in erster Linie auf Steigerungen des Indikators SDi 7.2.1 - Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Endenergieverbrauch - zurückzuführen:

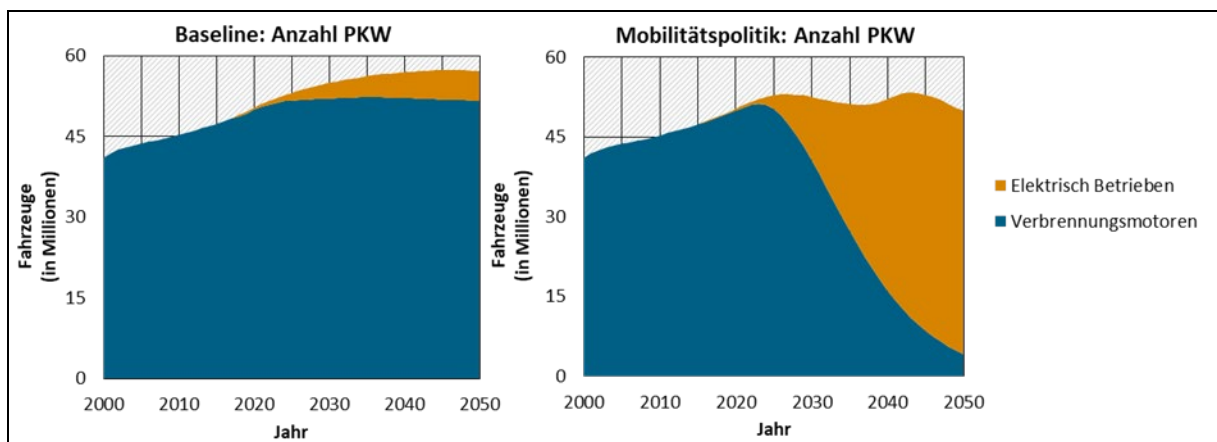
- ▶ Im Jahr 2050 werden in dieser Simulation 36 % des Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Quellen gedeckt. Dies repräsentiert weiterhin eine Steigerung gegenüber dem entsprechenden Anteil im Basisszenario (27 %).
- ▶ Diese Entwicklung ist auf die schrittweise Reduktion des Anteils von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor am gesamten Fahrzeugbestand und die Verringerung des PKW-Fahrzeugbestands pro Person zurückzuführen. Der Anteil von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor sinkt im Mobilitätsszenario bis zum Jahr 2050 auf 8 %.

Unter SDG 9 wird im Mobilitätsszenario eine 85%-ige Zielerreichung bis 2050 simuliert. Diese Entwicklung ist in erster Linie auf geringfügige, aber entscheidende Verbesserungen bei SDi 9.4.1 - CO₂-Emissionen pro Wertschöpfungseinheit - zurückzuführen.

- ▶ Die Umstellungen im Bereich Mobilität führen zu einem deutlichen Rückgang der Nachfrage nach fossilen Brennstoffen. Aufgrund des hohen Anteils des Verkehrs am Gesamtenergieverbrauch (23 % im Jahr 2022) resultieren daraus auch gesamtwirtschaftlich sichtbare Emissionsminderungen. Unter der in dieser Simulation unterstellten Beibehaltung des Energieträgermixes in der Stromerzeugung werden im Vergleich zum kombinierten Politikscenario aber insgesamt deutlich geringere Emissionsminderungen simuliert.

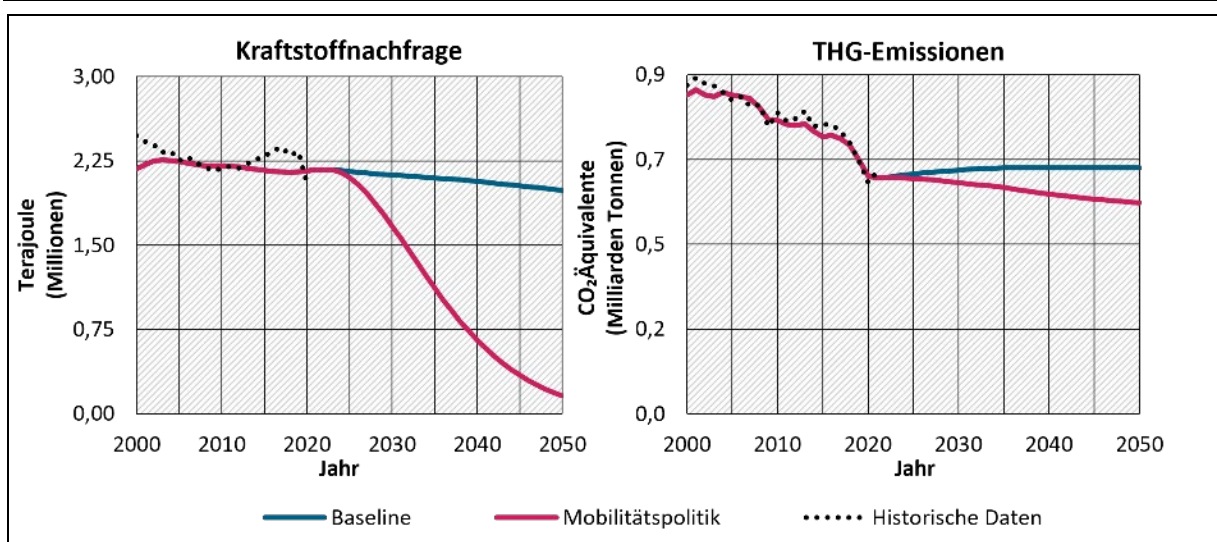
Für SDG 13 wird im Mobilitätsszenario bis 2050 eine 85%-ige Zielerreichung simuliert. Diese Entwicklung ist in erster Linie auf Verbesserungen bei SDi 13.2.2 - Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen zurückzuführen.

Abbildung 8: Veränderungen des Fahrzeugbestands im Mobilitätsszenario



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 9: Veränderung von Kraftstoffnachfrage und Treibhausgasemissionen im Mobilitätsszenario



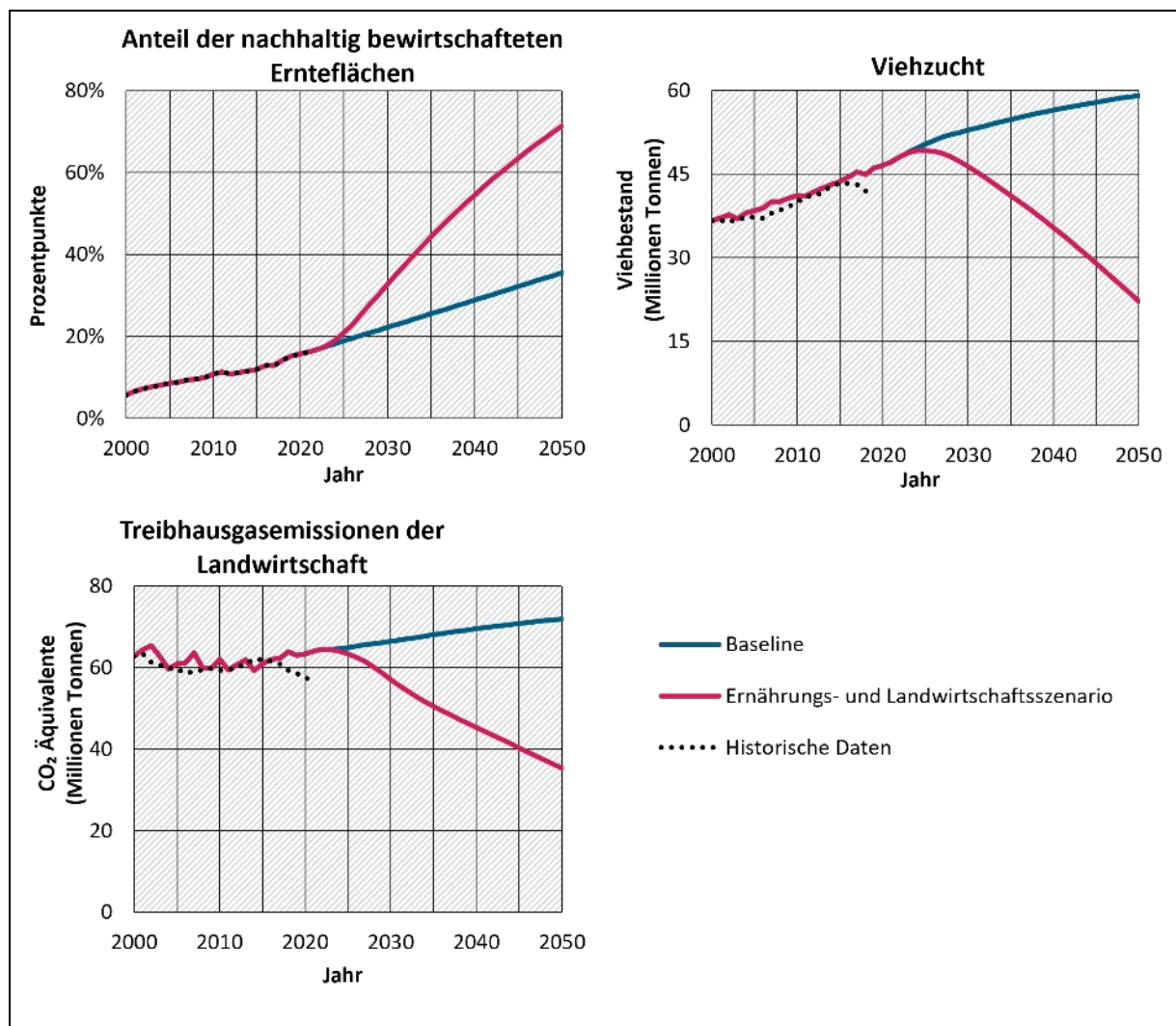
Quelle: Eigene Berechnungen

3.3.2.3 Landwirtschaft und Landnutzung

Im Szenario Ernährung und Landwirtschaft werden eine Reduktion der Produktion tierischer Erzeugnisse bei gleichzeitiger Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Anbaumethoden simuliert. Diese Maßnahmen stellen die Stickstoffbilanz der Böden wieder her, beschleunigen die Verringerung der nicht-energiebedingten landwirtschaftlichen Emissionen und stabilisieren die Beschäftigung in der Landwirtschaft. Für mehrere SDGs werden dabei deutliche Fortschritte bezüglich ihrer jeweiligen Zielerreichung simuliert.

SDG 2 wird im Jahr 2050 zu 67 % erreicht, im Vergleich zu 59 % im Basisszenario. Ursächlich hierfür sind in erster Linie erhebliche Verbesserungen unter SDi 2.4.1 (nachhaltige Bewirtschaftung der Ernteflächen).

Abbildung 10: Detailentwicklungen im Handlungsfeld Landwirtschaft und Landnutzung



Quelle: Eigene Berechnungen

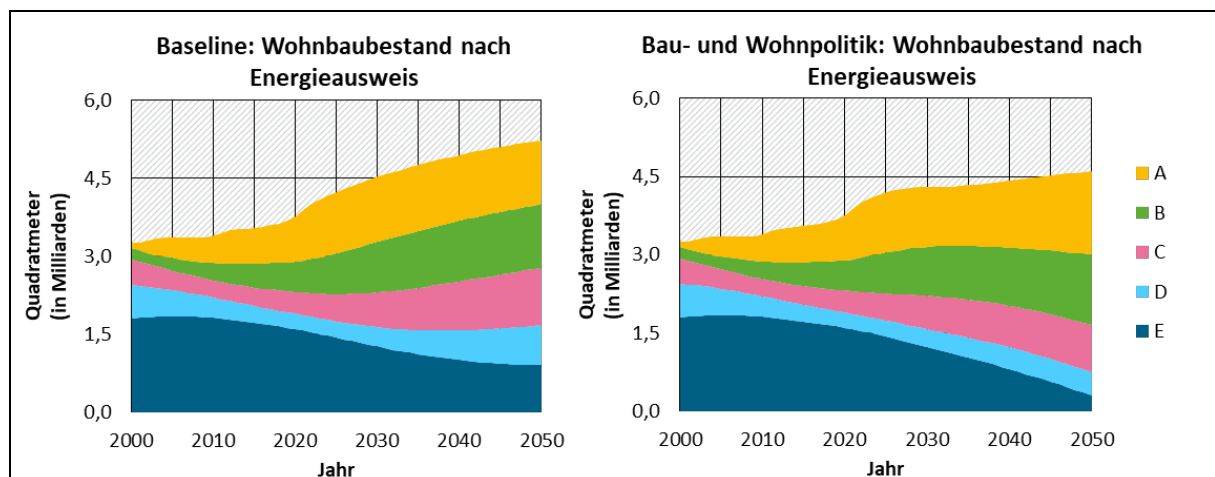
Für SDG 9 wird im Jahr 2050 eine 84 %-ige Zielerreichung simuliert. Hierfür verantwortlich sind Reduktionen der CO₂-Emissionen pro Wertschöpfungseinheit (SDi 9.4.1). Vor allem die nicht-energetischen landwirtschaftlichen Emissionen sinken im Vergleich zum Basisszenario um 50 %. Im Jahr 2050 repräsentieren die nicht-energetischen landwirtschaftlichen Emissionen 5 % sämtlicher simulierter THG-Emissionen.

Unter SDG 13 wird in diesem Szenario im Jahr 2050 eine Zielerreichung von 84 % simuliert. Diese Entwicklung ist in erster Linie auf geringfügige Verbesserungen bei den Pro-Kopf-THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten zurückzuführen (SDi 13.2.2).

3.3.2.4 Bauen und Wohnen

Das Szenario Bauen und Wohnen umfasst vier zentrale politische Maßnahmen: Förderung der Energieeffizienz von elektrischen Geräten im Haushalt, Erhöhung der Renovierungsrate des Gebäudebestands, Förderung des Holzbaus und Eindämmung der Gebäudebestandsausweitung. Die Bau- und Renovierungsaktivitäten bewirken im Modell einen Anstieg der Baukomponente der Industrieproduktion. Aus diesen Produktionssteigerungen und daraus resultierenden Reduktionen von Energieverbrauch (der Energieverbrauch privater Haushalte sinkt um 30 % im Vergleich zum Basisszenario) und Emissionen resultieren deutliche Verbesserungen unter SDG 9.

Abbildung 11: Detailentwicklungen im Szenario Bauen und Wohnen

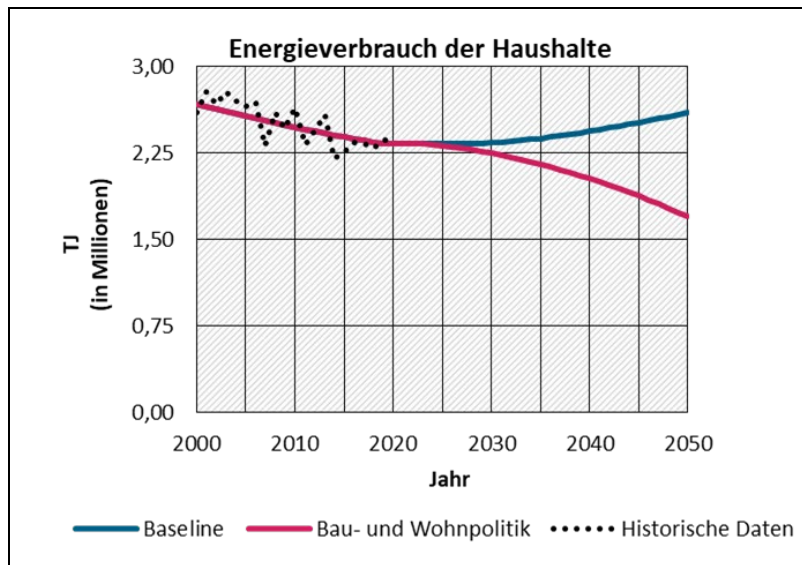


Quelle: Eigene Berechnungen

Unter SDG 12 wird unter den im Handlungsfeld Bauen und Wohnen unterstellten Umstellungen ein mit dem Basisszenario vergleichbarer Zielerreichungsgrad simuliert. Ursächlich hierfür ist eine langfristige Eindämmung des Wachstums des Gebäudebestands. Ohne diese Annahme würden die übrigen für das Handlungsfeld Bauen und Wohnen unterstellten Umstellungen im Vergleich zum Basisszenario deutlich niedrigere Zielerreichungsgrade ausweisen. Ursächlich hierfür ist ein in den Simulationen deutlich sichtbarer Trade-Off zwischen klima- und ressourcenpolitischen Zielsetzungen: Während der zuvor angesprochene Anstieg der Bauaktivitäten für die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudebereich notwendig ist, wird hierdurch auch die Nachfrage der Bauwirtschaft nach Baustoffen angetrieben. Der heimische Materialverbrauch (DMC) entwickelt sich daher in den Simulationen für das Handlungsfeld Bauen und Wohnen insgesamt etwas dynamischer als im Baselineszenario. Dieser Befund verdeutlicht die Notwendigkeit zur langfristigen Steigerung der Materialeffizienz in der Bauwirtschaft als ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Vermeidung von Trade-Offs zwischen klima- und ressourcenpolitischen Zielsetzungen.

Für SDG 13 wird unter Berücksichtigung der Umstellungen im Handlungsfeld Bauen und Wohnen bis zum Jahr 2050 eine 85%-ige Zielerreichung simuliert. Diese Entwicklung ist in erster Linie auf Verbesserungen in der Entwicklung des Indikators SDi 13.2.2 - Pro-Kopf-THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten zurückzuführen. Die Reduktion des Energieverbrauchs der Haushalte ist Hauptursache dieser Entwicklung.

Abbildung 12: Entwicklung des Energieverbrauchs im Szenario Bauen und Wohnen



Quelle: Eigene Berechnungen

3.3.2.5 Energieversorgung

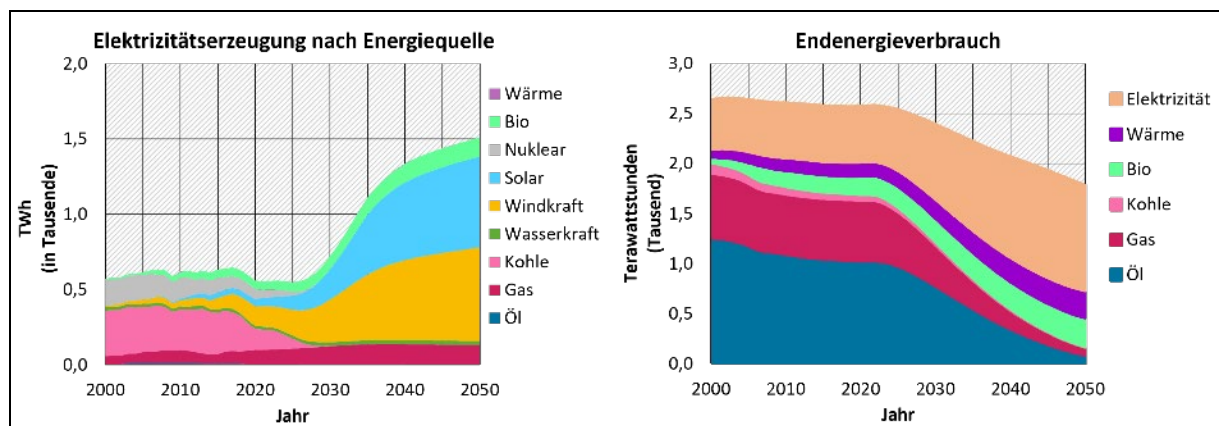
3.3.2.5.1 Elektrizitätserzeugung

Die im Handlungsfeld Energieversorgung simulierte Umstellungen berücksichtigen eine vollständige Reduktion des Einsatzes von nuklearen Brennstoffen, Öl und Kohle in der Stromerzeugung ab dem Jahr 2030. Zur Kompensation werden die Kapazitäten zur Verwendung erneuerbarer Energiequellen in der Elektrizitätserzeugung intensiv ausgebaut, wobei der Schwerpunkt auf Solar- und Windenergie liegt.

Mit diesen Umstellungen wird unter SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie) eine 83 %-ige Zielerreichung im Jahr 2050 erreicht. Ursächlich hierfür ist die Entwicklung von zwei zentralen Indikatoren: SDi 7.2.1 - Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch und SDi 7.3.1 - Energieintensität gemessen als Primärenergie zum BIP. Im Jahr 2050 stammen 85 % des Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Quellen, ein deutlicher Sprung gegenüber den 27 % im Basisszenario. Dies spiegelt den hohen Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix wider, der 2050 bei rund 90 % liegt.

Unter SDG 12 werden im Jahr 2050 durchschnittliche Indikatorwerte in Höhe von 81 % simuliert. Diese Entwicklung ist größtenteils auf die durch die reduzierte Nachfrage nach fossilen Materialien ausgelösten Steigerungen der Indikatoren SDi 12.2.1 und SDi 12.2.2 zurückzuführen. Bis zum Jahr 2050 wird der Verbrauch fossiler Brennstoffe in Deutschland im Vergleich zum Basisszenario um 40 % gesenkt. Es ist wichtig zu beachten, dass dabei die größten Veränderungen bereits vor dem Jahr 2030 erzielt werden, was mit der schrittweisen Stilllegung der Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen übereinstimmt. Dieser strategische Übergang unterstreicht die entscheidende Rolle des Energiesektors bei der Erreichung der angestrebten Ziele für SDG 12. Durch eine deutliche Reduktion des Endenergieverbrauchs (wie in Abbildung 13 dargestellt) bei gleichzeitiger Elektrifizierung, kann diese Reduktion fossiler Treibstoffe erreicht werden.

Abbildung 13: Detailentwicklungen im Handlungsfeld Energieversorgung



Quelle: Eigene Berechnungen

Auch bei der Umsetzung von SDG 13 in Deutschland werden durch diese Umstellungen Fortschritte simuliert. Die diesbezüglich durch das Modell abgebildeten Indikatoren steigen im Mittel auf einen Wert von 86 % an. Dies ist in erster Linie auf die kontinuierlichen Verbesserungen bei SDi 13.2.2 zurückzuführen, welches sich auf die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen (CO₂-Äquivalente) konzentriert.

3.3.2.5.2 Einfluss der CO₂-Steuer

Die Simulation der Effekte einer CO₂-Steuer zeigt, dass eine Verteuerung der Kohlenstoffemissionen einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der Kohlenstoffemissionen bei gleichzeitig geringen Beiträgen zur Förderung erneuerbarer Energien und nachhaltiger Konsum- und Produktionsmuster leisten kann. Zwei wesentliche Effekte prägen dabei die entsprechenden Simulationsergebnisse:

- ▶ Die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen wird durch den Anstieg der Kosten für fossile Brennstoffe insgesamt signifikant gesenkt. Bis 2050 wird der Gasverbrauch um 10 % reduziert. Die Nachfrage nach Kohle wird im Vergleich zum Basisszenario allein durch die simulierte CO₂-Steuer um 75 % reduziert.
- ▶ Da in der Simulation keine Verwendung des Steueraufkommens für kompensierende Staatsausgaben unterstellt wird, beeinflusst die so parametrisierte CO₂-Steuer nicht nur die energie- und umweltbezogenen SDGs, sondern auch SDG 10 (weniger Ungleichheiten): Die zusätzliche Steuerlast dämpft, in Abwesenheit sonstiger kompensierender staatlicher Maßnahmen das Wirtschaftswachstum. In den Modellsimulationen resultiert hieraus auch eine Reduktion der staatlichen Transfers, wodurch insbesondere das verfügbare Einkommen der Haushalte mit niedrigem Einkommen reduziert wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Zusammenfassung der im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt "Integrierte Betrachtung der UN-Nachhaltigkeitsziele (SDGs) in Transformationspfaden hin zu einem ressourcenschonenden und treibhausgas-neutralen Deutschland" wurde von der GWS mbH (GWS; Osnabrück, Deutschland), dem Millennium Institute (MI; Washington DC, USA & Genf, Schweiz) und ERASME (Aubière, Frankreich) durchgeführt. Projektauftrag war, für Deutschland einen Modellierungs- und Bewertungsansatz zur integrierten Betrachtung verschiedener Nachhaltigkeitsaspekte in ambitionierten Klima- und Ressourcenschutz-Szenarien zu entwickeln und anzuwenden. Als zu bewertende Nachhaltigkeitsaspekte wurden dabei die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (engl. UN Sustainable Development Goals, SDGs, United Nations 2015) vorgegeben.

Zu Beginn des Vorhabens hat das Konsortium eine umfassende Metastudie durchgeführt. Um den aktuellen Forschungsstand zu Methoden für und Erkenntnisse aus Anwendungen numerischer Bewertung von SDG-Wechselwirkungen und deren Entwicklung in zukünftigen Entwicklungspfaden zu ermitteln, wurden dabei zunächst 1701 Publikationen in einer Datenbank erfasst und in einer systematischen Literaturanalyse statistisch ausgewertet. Auf Grundlage der statistischen Auswertungen wurden 275 Publikationen für eine inhaltliche Überprüfung ihrer Abstracts ausgewählt. Von diesen 275 Publikationen wurden abschließend 40 Publikationen einer Volltextanalyse unterzogen.

Auf Basis dieser Volltextanalyse wurden Integrierte Assessment Modelle (IAM), makroökonomische Modelle und systemdynamische Modelle als grundsätzlich für gesamtwirtschaftliche ex ante Bewertungen des Klima- und Ressourcenschutz-Nexus verfügbare Methoden identifiziert. Unter diesen Modellklassen wurde zudem das systemdynamische iSDG-Modell als ein bereits in der Vergangenheit häufig für nationale Analysen von SDG-Wechselwirkungen angewandter Bewertungsansatz identifiziert (Allen et al. 2019, 2021). Während entsprechende Anwendungen traditionell insbesondere für Volkswirtschaften des Globalen Südens im Kontext der Entwicklungsarbeit vorgenommen wurden (Allen et al. 2020; Collste, Pedercini & Cornell 2017; Pedercini et al. 2019), wurde das iSDG-Modell in jüngerer Zeit auch für Simulationsstudien der SDG-Wechselwirkungen in hochentwickelten Volkswirtschaften eingesetzt (Allen et al. 2019; Hoffmann et al. 2024; Spittler & Kirchner 2022). Da das Forschungskonsortium zur Durchführung dieses Vorhabens ebenfalls auf das iSDG-Modell zurückgreifen konnte,²⁶ wurde im weiteren Projektverlauf dieses Modell für entsprechende Analysen deutscher Entwicklungspfade kalibriert und angepasst. Hierdurch konnte unter anderem die durch die Leistungsbeschreibung vorgegebene Anknüpfung der eigenen Projektaktivitäten an bisherige und laufende, thematisch relevante und international sichtbare, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umfassend sichergestellt werden.

Anpassungen des iSDG-Modells

Bezüglich der in den eigenen SDG-Analysen zu berücksichtigenden umweltpolitischen Transformationspfade wurde durch die Leistungsbeschreibung eine Berücksichtigung von Annahmen des „GreenSupreme“-Szenarios der RESCUE Studie (Dittrich et al. 2020) vorgegeben. Zur Umsetzung dieses Arbeitsauftrags musste der übliche iSDG-Bewertungsansatz nicht nur auf

²⁶ Die für gesamtwirtschaftliche Bewertungen von Transformationspfaden geeigneten Modelle wurden in langjährigen Entwicklungsprozessen von eigenständigen Institutionen entwickelt und sind daher in der Regel nicht frei zugänglich. Dies gilt sowohl für Integrierte Assessment Modelle als auch für makroökonomische sowie systemdynamische Modelle.

deutsche Wirkungszusammenhänge kalibriert, sondern insbesondere zur Abbildung von Handlungsfeldern des GreenSupreme“-Szenarios deutlich angepasst werden.

Zur Abbildung ökonomischer Entwicklungen werden im iSDG Modell angebotsseitige Modellierungsansätze unter Anwendung von Cobb-Douglas (CD, Cobb & Douglas 1928)-Produktionsfunktionen genutzt. Unter Anwendung dieser Funktionen werden Veränderungen des gesamtwirtschaftlichen Produktionsniveaus aus Veränderungen der Verfügbarkeiten der Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital sowie von Veränderungen ihrer jeweiligen Produktivitäten (welche modellendogen hergeleitet werden) abgeleitet. Nachfragefaktoren bleiben dabei unberücksichtigt. Bei der Projektion gesamtwirtschaftlicher Produktionstätigkeiten unterscheidet der iSDG-Bewertungsansatz üblicherweise lediglich drei unterschiedliche Wirtschaftsbereiche (Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungen). Diese hochaggregierte Darstellung erwies sich im weiteren Projektverlauf als nicht hinreichend, um zentrale Annahmen der RESCUE Studie zur Entwicklung produktionsseitiger Einflüsse auf gesamtwirtschaftliche Materialinanspruchnahmen zu modellieren.

Für das in diesem Vorhaben angewandte Modell wurde daher in Anlehnung an internationale Wirtschaftsklassifikationen eine Erweiterung der üblichen iSDG-Industrie-Modellierung entwickelt. In den Modellanwendungen für Deutschland konnten infolge dieser Entwicklungsleistungen unterschiedliche Materialnachfragen aus der Entwicklung der Produktionstätigkeiten folgender Industriezweige hergeleitet werden:

- 1) Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden;
- 2) Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen;
- 3) Baugewerbe;
- 4) Herstellung von Nahrungs- und Genussmitteln, Getränken und Tabakwaren;
- 5) Herstellung von Holz- und Papiererzeugnissen, Druckerei;
- 6) Herstellung von Chemikalien und chemischen Erzeugnissen;
- 7) Sonstige Industrie.

Neben dieser für den gesamten iSDG-Modellierungsansatz sehr weitreichenden Erweiterung der bisherigen Projektion industrieller Produktionsniveaus wurden zudem individuelle Anpassungen in bereits existierenden Teilmodulen vorgenommen sowie eine explizite Wohngebäude-Modellierung parametrisiert. Für die vollständige Parametrisierung des Modells wurden insgesamt ca. 200 Zeitreihen zur Abbildung der jährlichen Entwicklung sozialer, ökonomischer und ökologischer Indikatoren in Deutschland in der Modelldatenbank erfasst.

Zentrale Ergebnisse

Der erweiterte SDG-Bewertungsansatz für Deutschland wurde zur Fortschreibung einer Baseline-Entwicklung sowie alternativer Transformationsszenarien genutzt. Die weitere Entwicklung der durch das Modell abgebildeten Zeitreihen wurde dabei jeweils bis zum Jahr 2050 simuliert. Im Vergleich der jeweiligen Simulationsergebnisse zeigt sich, dass die in den Simulationen unterstellten zusätzlichen Umstellungen mit Steigerung der modellierten SDG-Indikatoren einhergehen. Offensichtliche Zielkonflikte auf die SDG-Zielerreichung in Deutschland konnten dabei nicht identifiziert werden: Im Jahr 2050 ist das klima- und ressourcenpolitische PolitikszENARIO im Vergleich zur Baseline dadurch geprägt, dass keine signifikant negativen Auswirkungen auf einzelne SDG-Zielerreichungsgrade simuliert werden. Insbesondere im Hinblick auf SDG 2 (kein Hunger), SDG 7 (bezahlbare und saubere Energie), SDG 12

(nachhaltige/r Konsum und Produktion) und SDG 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz) werden unter Berücksichtigung der zusätzlichen klima- und ressourcenpolitischen Umstellungen allerdings deutliche Steigerungen der durch das Modell abgebildeten SDG-Indikatoren simuliert. Weitere, wenn auch weniger prägnante Verbesserungen der Zielerreichung zeigen sich zudem für SDG 6 (sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen), SDG 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum) und SDG 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur).

Für die Politiksimulation kennzeichnend ist ihr Green Growth-Charakter: Während die simulierten klimapolitischen Umstellungen tendenziell dämpfend auf das Wirtschaftswachstum wirken, werden diese dämpfenden ökonomischen Effekte in der integrierten klima- und ressourcenpolitischen Transformation durch deutliche expansive ökonomische Effekte der unterstellten Circular Economy-Umstellungen überkompensiert. Diese expansiven Effekte werden in den Simulationen durch massive Produktivitätssteigerungen ausgelöst. Trotz dieser expansiven Effekte wird in diesen Simulationen bis zum Jahr 2050 ein Rückgang des inländischen Rohstoffkonsums (Domestic Material Consumption, DMC) um 40 % im Vergleich zur Baseline erreicht. Die klimapolitischen Annahmen des Politik Szenarios implizieren bis zum Jahr 2050 eine Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen um 84 % im Vergleich zu den Ausgangsniveaus des Jahres 1990. Diese, mit ursprünglichen Zielwerten der deutschen Politik zur Ermöglichung einer globalen Einhaltung des 2°C-Ziels kompatiblen Reduktionen, werden ohne Modellierung von Technologien zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung simuliert. Die inzwischen politisch bis zum Jahr 2050 für Deutschland angestrebte Treibhausgasneutralität wird damit in den iSDG-Simulationen allerdings nicht erreicht.

In der RESCUE Studie wurde im „GreenSupreme“-Szenario durch sämtliche unterstellten Umstellungen eine Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um 97 % erreicht. Beim Ergebnisvergleich mit der RESCUE-Studie muss allerdings angemerkt werden, dass für die RESCUE-Studie keine dynamischen Modellierungen vorgenommen wurden. Dies bedeutet insbesondere, dass die in unseren Simulationen markant beobachtbaren expansiven ökonomischen Effekte der unterstellten Circular Economy-Umstellungen durch den Bewertungsansatz der RESCUE-Studie nicht erfasst wurden: Das „GreenSupreme“-Szenario der RESCUE Studie unterstellt ab dem Jahr 2030 ein Nullwachstum der Wirtschaftsleistung in Deutschland. Die Befunde unserer dynamischen Modellsimulationen weichen von dieser exogenen Annahme der RESCUE Studie ab. Als eine wichtige Erkenntnis des gegenständigen Vorhabens kann daher unter anderem festgehalten werden, dass die Projektionspfade dynamischer Simulationen durch die Berücksichtigung relevanter Rückkopplungsschleifen in zentralen Szenariodetails deutlich von den Befunden thematisch vergleichbarer statischer Modellierungen abweichen können.

Sowohl unter klima- wie auch unter ressourcenschonungspolitischen Aspekten erweisen sich die in den Handlungsfeldern Industrie und Energiesysteme simulierten Umstellungen als besonders wirksam. Der inländische Materialverbrauch wird aufgrund der im Industriesektor simulierten Effekte der Kreislaufwirtschaft deutlich reduziert. Auch die simulierten Umstellungen des Energiesystems bewirken Reduktionen des Materialverbrauchs, da derzeit noch deutliche Anteile des inländischen Materialverbrauchs auf fossile Brennstoffe entfallen. Inländische Treibhausgasemissionen werden insbesondere durch die simulierten Umstellungen des Energiesystems (Ausstieg aus fossilen Brennstoffen) reduziert. Im Vergleich zu den hier angesprochenen Handlungsfeldern erweisen sich die ökologischen Auswirkungen der in den übrigen Handlungsfeldern simulierten Umstellungen als deutlich geringer.

Die Auswirkungen des ehrgeizigen Klima- und Ressourcenpfads sind auch für die Erreichung der SDGs positiv: Die SDG-Erreichung ist im kombinierten Politik Szenario höher als im Basis-

szenario. Dieser Effekt betrifft jedoch hauptsächlich SDG-Indikatoren, welche durch Veränderungen von Emissionen und Materialverbrauch direkt beeinflusst werden.

Signifikante Spillover-Effekte konnten in den Simulationen nicht beobachtet werden. Diesbezüglich ist darauf hinzuweisen, dass durch das iSDG-Modell lediglich Interaktionen zwischen den SDGs auf nationaler Ebene abgebildet werden. Internationale Spillover-Effekte, zum Beispiel in Form von importierten Emissionen oder exportierten Umweltbelastungen, konnten daher im Rahmen dieser Studie nicht analysiert werden.

Eine wichtige Erkenntnis war zudem, dass einzelne Umstellungen für sich genommen möglicherweise keine signifikanten Auswirkungen hervorrufen, weil beispielsweise steigende Renovierungsaktivitäten (*ceteris paribus*) auch die Verwendung von Materialien steigern oder Produktivitätssteigerungen Rebound-Effekte auslösen. In einigen Fällen mussten dabei auch absolute Reduktionsziele parametrisiert werden. Dies unterstreicht die Bedeutung einer integrierten Ressourcen- und Klimastrategie, die verschiedene Arten von Maßnahmen einsetzt, um negative Auswirkungen wie Rebound-Effekte auszugleichen und positive Entwicklungen zu fördern.

4.2 Ausblick auf verbleibenden Forschungsbedarf

Mit einer durchschnittlichen SDG-Indikatorausprägung von 78 % weist Deutschland bereits heute hohe SDG-Zielerreichungsgrade auf. Insbesondere für die internationalen Indikatoren zu den SDGs 3 (Gesundheit und Wohlergehen), 4 (hochwertige Bildung), 6 (sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen) und 17 (Partnerschaften zur Erreichung der Ziele) werden durch das Modell Merkmalsausprägungen für Deutschland ausgewiesen, welche aufgrund der zugrundeliegenden Definitoren kaum noch zu steigern sind. Für ein einkommensstarkes Land wie Deutschland erscheinen die im Modell zu den SDGs 2 (kein Hunger), 5 (Geschlechtergleichheit) und 10 (weniger Ungleichheiten) abgebildeten Indikatorausprägungen allerdings niedrig.

Diese Beobachtungen geben Anlass dazu, vor zukünftigen Anwendungen des iSDG-Ansatzes zunächst die im Modell angewandten Bewertungskriterien zur Messung von Zielerreichungsgraden zu evaluieren. Wie jedes andere Modell bildet auch das iSDG-Modell ein vereinfachtes Abbild der Realität ab. Dies gilt auch bezüglich der abgebildeten SDG-Indikatoren: Da das Modell aus dem T21-Modell hervorgegangen ist, wurde es ursprünglich für die Bewertung der Entwicklungsperspektiven von Ländern mit niedrigem Einkommen konzipiert (Allen et al. 2020; Collste et al. 2017a; Pedercini et al. 2019). Folglich wurde die Auswahl der kartierten SDG-Indikatoren in erster Linie auf jene Indikatoren ausgerichtet, die für Ländergruppen mit niedrigem Einkommen als relevant angesehen werden können.

Unsere eigenen Erfahrungen aus den Modellanwendungen für Deutschland bestätigen damit Erkenntnisse, welche auch durch Befunde der eigenen Metastudie (Abschnitt 2.1) gestützt werden: Internationale Erfahrungen mit SDG-Monitoring-Ansätzen zeigen, dass es schwierig, wenn nicht sogar unmöglich ist, allgemeingültige Bewertungsmethoden zu etablieren. "Abhängig von den gewählten Indikatoren und den angewandten Methoden können die Länder sehr unterschiedliche relative Bewertungen erhalten" (Miola et al. 2019b: 1). Da die international etablierten Indikatoren des UN Global Indicator Framework traditionell (zumindest teilweise) auf eine Erfassung spezifischer Entwicklungssituationen in gering entwickelten Weltregionen abzielen, empfehlen wir für zukünftige quantitative Beurteilung von SDG-Entwicklungen in hochentwickelten Nationen eine möglichst weitergehende Verwendung national angepasster SDG-Indikatoren.

Das Ziel 7 ("bezahlbare und saubere Energie") bietet ein in dieser Hinsicht bemerkenswertes Beispiel. Unter diesem Ziel werden derzeit im globalen Indikatorrahmen der UN folgende Indi-

katoren betrachtet: Anteil der Bevölkerung mit Zugang zu Elektrizität; Anteil der Bevölkerung, der primär auf saubere Brennstoffe und Technologien angewiesen ist; Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch; Energieintensität gemessen an der Primärenergie und am BIP; internationale Finanzströme. Alle diese Indikatoren haben für sich genommen ihre Berechtigung. Dennoch kann man sicher nicht behaupten, dass dieses Indikatorenset eindeutige Aussagen über den Stand der Versorgung mit "bezahlbarer und sauberer Energie" in Deutschland liefert. Angesichts aktueller nationaler politischer Debatten ist es zumindest verwunderlich, dass z.B. die Kosten- und Verteilungseffekte der privaten Haushalte im Rahmen von Ziel 7 noch nicht berücksichtigt wurden.

Für entsprechende Folgeaktivitäten erscheint ein multidisziplinärer Ansatz sinnvoll: Aus einer Analyse politischer Debatten könnten umwelt- und gesellschaftspolitische Schlüsselfaktoren für eine nachhaltige Entwicklung in Deutschland identifiziert werden. Darauf aufbauend könnten dann aus Sicht der angewandten Statistik Indikatoren entwickelt werden, um die identifizierten Schlüsselfaktoren abzubilden. Konzeptionell sollten entsprechende Forschungsarbeiten idealerweise auch geeignete Maßnahmen für eine angemessene Bewertung ausgewählter Indikatoren vertieft diskutieren. Ähnlich wie bei den in dieser Studie vorgestellten iSDG-Anwendungen würden diese Indikatoren dann durch geeignete Ex-ante-Simulationsansätze evaluiert werden.

Wir konnten in diesem Projekt weder auf politikwissenschaftliche Expertise zurückgreifen, noch wurden wir beauftragt, eigene Indikatoren für die Nachhaltigkeitsbewertung in Deutschland zu entwickeln und anzuwenden. Stattdessen wurden im Rahmen dieses Projekts notwendige methodische Anpassungen des zugrunde liegenden iSDG-Ansatzes vorgenommen, um eine erste ex-ante-Bewertung der SDG-Implikationen eines integrierten Transformationspfads durchzuführen. Damit hat dieses Projekt die vorgegebenen Ziele erfolgreich erreicht.

In Übereinstimmung mit dem konzeptionellen Aufbau der RESCUE-Studie wurden in unseren Politiksimulationen integrierte klima- und ressourcenpolitische Veränderungen in den folgenden Handlungsfeldern analysiert: Energiesystem, Industrie (inkl. Kreislaufwirtschaft), Bauen und Wohnen, Mobilität, Ernährung und Landwirtschaft. Dabei wurde während der Vorbereitungsphase der Politikparametrisierungen deutlich, dass der iSDG-Standardrahmen eine sehr direkte Parametrisierung klimapolitischer Annahmen ermöglicht. Im Gegensatz dazu erwies sich die Parametrisierung ressourcenpolitischer Annahmen als wesentlich komplexer und arbeitsintensiver. In diesem Sinne ist iSDG eher mit einem traditionellen integrierten Bewertungsmodell als mit einem makroökonomischen Modell vergleichbar.

Die in Kapitel 3 dokumentierten Modellanpassungen und die daraus resultierenden, weitergehenden Parametrisierungsmöglichkeiten dienen daher in erster Linie zur besseren Abdeckung der für ressourcenpolitische Bewertungen relevanten Wirkungszusammenhänge und daraus resultierenden ökonomischen Rückkopplungsschleifen. Durch diese Entwicklungsarbeit wurde die Simulationsfähigkeit des Modells bereits deutlich erweitert. Dennoch identifizieren die Autoren im Abschlussbericht weiterhin verbleibenden Raum für zukünftige Weiterentwicklungen. Aus Budgetgründen konnten diese in diesem Projekt nicht berücksichtigt werden. Solange das iSDG-Modell aber noch um Abbildungen weiterer Spillover ergänzt werden könnte, sollten zukünftige Modellnutzer vor weiteren Anwendungen des Modells prüfen, ob und in welchem Umfang die im Abschlussbericht benannten verbleibenden Entwicklungsoptionen umsetzbar sind.

Die RESCUE-Studie simulierte sehr detaillierte Annahmen zur Entwicklung von Produktionstechnologien, sektorspezifischen Zwischen- und Endnachfragestrukturen und den daraus resultierenden Produktionsniveaus in einem Soft-Link-Modellierungsrahmen, der insbesondere auch tief disaggregierte Analysen von material- und emissionsintensiven Sektoren (Energie-

erzeugung, Verkehr und Landwirtschaft) ermöglichte. Um detaillierte Entwicklungen abzubilden, die im iSDG-Modell nicht eigenständig abgebildet werden, könnte in weiteren Forschungsprojekten ebenfalls eine Soft-Link-Modellierung angestrebt werden. Dies könnte unter anderem eine Möglichkeit bieten, internationale Entwicklungen in entsprechenden Folgebewertungen mit zu berücksichtigen.

Da iSDG nur nationale Entwicklungen modelliert, können internationale Spillover nicht durch diesen Ansatz abgedeckt werden. Während multinationale Ex-ante-Simulationsstudien in der SDG-Literatur bisher nur wenig Beachtung finden, hat unsere Meta-Analyse ergeben, dass (insbesondere im Bereich der Ressourcenpolitik) multinationale Ex-ante-Simulationsmodelle bereits gut etabliert sind. Durch die Anwendung entsprechender multinationaler Modellierungen könnten ergänzende Forschungsprojekte daher auch multinationale Spillover eingehend analysieren.

Referenzen

- Aguilar-Hernandez, Glenn A.; Dias Rodrigues, João F. und Tukker, Arnold (2021): Macroeconomic, social and environmental impacts of a circular economy up to 2050: A meta-analysis of prospective studies. In: *Journal of Cleaner Production* 278, 1-11. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123421.
- Allen, Cameron; Biddulph, Annabel; Wiedmann, Thomas; Pedercini, Matteo und Malekpour, Shirin (2024): Modelling six sustainable development transformations in Australia and their accelerators, impediments, enablers, and interlinkages. In: *Nature communications* 15 (1), S. 594. DOI: 10.1038/s41467-023-44655-4.
- Allen, Cameron; Metternicht, Graciela und Wiedmann, Thomas (2016): National pathways to the Sustainable Development Goals (SDGs): A comparative review of scenario modelling tools. In: *Environmental Science & Policy* 66 (C), S. 199–207. DOI: 10.1016/j.envsci.2016.09.
- Allen, Cameron; Metternicht, Graciela; Wiedmann, Thomas O. und Pedercini, Matteo (2019): Greater gains for Australia by tackling all SDGs together but the last steps will be the most challenging. In: *Nature Sustainability* 2 (11), S. 1041–1050. DOI: 10.1038/s41893-019-0409-9.
- Allen, Cameron; Metternicht, Graciela; Wiedmann, Thomas O. und Pedercini, Matteo (2021): Modelling national transformations to achieve the SDGs within planetary boundaries in small island developing states. In: *Global Sustainability* 4, 1-13. DOI: 10.1017/sus.2021.13.
- Allen, Cameron; Reid, Michael; Thwaites, John; Glover, Rod und Kestin, Tahl (2020): Assessing national progress and priorities for the Sustainable Development Goals (SDGs). experience from Australia. In: *Sustainability Science* 15 (2), S. 521–538. DOI: 10.1007/s11625-019-00711-x.
- Bali Swain, Ranjula und Ranganathan, Shyam (2021): Modeling interlinkages between sustainable development goals using network analysis. In: *World Development* 138, S. 105136.
- Barbero Vignola, Giulia; Acs, Szvetlana; Borchardt, Steve; Sala, Serenella; Giuntoli, Jacopo; Smits, Paul und Marelli, Luisa (2020): Modelling for sustainable development goals (Sdgs). Overview of jrc models. JRC science for policy report EUR 30451 EN, Luxembourg: Europäische Kommission. DOI: 10.2760/697440.
- Bennich, Therese; Weitz, Nina und Carlsen, Henrik (2020): Deciphering the scientific literature on sdg interactions. A review and reading guide. In: *Science of The Total Environment* 728, S. 138405. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138405.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2024): Millenniumsentwicklungsziele (MDGs). Online verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/mdg-millenniumsentwicklungsziele-mdgs-14674>, zuletzt geprüft am 12.06.2024.
- Cobb, Charles W. und Douglas, Paul H. (1928): A Theory of Production. In: *The American Economic Review* 18 (1), S. 139–165. Online verfügbar unter: <http://www.jstor.org/stable/1811556>, zuletzt geprüft am 06.04.2022.
- Collste, David; Pedercini, Matteo und Cornell, Sarah E. (2017): Policy coherence to achieve the SDGs. using integrated simulation models to assess effective policies. In: *Sustainability Science* 12 (6), S. 921–931. DOI: 10.1007/s11625-017-0457-x.
- Distelkamp, Martin und Meyer, Mark (2019): Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. In: *Ecological Economics* 155, S. 88–104. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.07.014.
- Dittrich, Monika; Gerhardt, Norman; Schoer, Karl; Dünnebeil, Frank; Becker, Sarah; von Oehsen, Amany; Vogt, Regine; Köppen, Susanne; Biemann, Kirsten; Böttger, Diana; Ewers, Birte; Frischmuth, Felix und Fehrenbach,

Horst (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. Climate Change 05/2020, Dessau-Roßlau.

Dixon-Decleve, Sandrine; Gaffney, Owen; Ghosh, Jayati; Randers, Jorgen; Rockstrom, Johan und Stoknes, Per E. (2022): Earth for All: A Survival Guide for Humanity. New Society Publishers. Online verfügbar unter: <https://books.google.de/books?id=S3dsEAAAQBAJ>.

Folke, Carl; Biggs, Reinette; Norström, Albert V.; Reyers, Belinda und Rockström, Johan (2016): Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. In: Ecology and Society 21 (3), S. 41. DOI: 10.5751/ES-08748-210341.

Günther, Jens; Lehmann, Harry; Nuss, Philip und Purr, Katja (2019): Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality. RESCUE. Summary Report. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. DOI: 10.1787/888933026145.

Hafner, Sarah; Anger-Kraavi, Annela; Monasterolo, Irene und Jones, Aled (2020): Emergence of New Economics Energy Transition Models. A Review. In: Ecological Economics 177, S. 106779. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2020.106779.

Hatfield-Dodds, Steve; Schandl, Heinz; Newth, David; Obersteiner, Michael; Cai, Yiyong; Baynes, Tim; West, James und Havlík, Petr (2017): Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. In: Journal of Cleaner Production 144, S. 403–414. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.170.

Hoffmann, Martin; Spittler, Nathalie; Aigner, Ernest; Körner, Daniel und Hinterberger, Friedrich (2024): Earth4All: Austria. Five turnarounds towards wellbeing for all within planetary boundaries. : Club of Rome, Millennium Institute, Universität für Bodenkultur.

International Council for Science (ICSU) (2017): A guide to SDG interactions. from science to implementation. Paris. DOI: 10.24948/2017.01.

Le Blanc, David (2015): Towards integration at last? The sustainable development goals as a network of targets. In: Sustainable Development 23 (3), S. 176–187.

McCarthy, Andrew; Dellink, Rob und Bibas, Ruben (2018): The Macroeconomics of the Circular Economy Transition. A Critical Review of Modelling Approaches. OECD Environment Working Papers 130, Paris. DOI: 10.1787/af983f9a-en.

Meyer, Mark; Hirschnitz-Garbers, Martin und Distelkamp, Martin (2018): Contemporary Resource Policy and Decoupling Trends. Lessons Learnt from Integrated Model-Based Assessments. In: Sustainability 10 (6), S. 1858. DOI: 10.3390/su10061858.

Meyer, Mark; Löschel, Andreas und Lutz, Christian (2021): Carbon price dynamics in ambitious climate mitigation scenarios: an analysis based on the IAMC 1.5 °C scenario explorer. In: Environmental Research Communications 3 (8), S. 81007. DOI: 10.1088/2515-7620/ac02ad.

Miola, Apollonia; Borchardt, Steve; Neher, Frank und Buscaglia, Daniela (2019): Interlinkages and policy coherence for the Sustainable Development Goals implementation. An operational method to identify trade-offs and co-benefits in a systemic way. JRC technical reports, Luxembourg: Publications Office of the European Union. DOI: 10.2760/780152.

Nilsson, Måns; Griggs, David und Visbeck, Martin (2016): Policy: Map the interactions between Sustainable Development Goals. In: Nature 534 (7607), S. 320–322. DOI: 10.1038/534320a.

Pedercini, Matteo (2011): Development Policy Analysis in Mali. Sustainable Growth Prospects. In: Barthe, Gilles; Pardo, Alberto und Schneider, Gerardo (Hg.): Software Engineering and Formal Methods. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 447–463.

- Pedercini, Matteo; Arquitt, Steve; Collste, David und Herren, Hans (2019): Harvesting synergy from sustainable development goal interactions. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 116 (46), S. 23021–23028.
- Pedercini, Matteo; Zuellich, Gunda; Dianati, Kaveh und Arquitt, Steven (2018): Toward achieving sustainable development goals in Ivory Coast. Simulating pathways to sustainable development. In: Sustainable Development 26 (6), S. 588–595.
- Pradhan, Prajal; Costa, Luís; Rybski, Diego; Lucht, Wolfgang und Kropp, Jürgen P. (2017): A Systematic Study of Sustainable Development Goal (SDG) Interactions. In: Earth's future 5 (11), S. 1169–1179. DOI: 10.1002/2017EF000632.
- Price, Kenneth V.; Storn, Rainer M. und Lampinen, Jouni A. (2005): Differential evolution. A practical approach to global optimization. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-31306-0.
- Spittler, Nathalie und Kirchner, Mathias (2022): Ein SDG Modell für Österreich. Erfassung der Wechselwirkungen zw. SDG13 & anderen SDGs zur Simulation von Entwicklungspfaden & Kosten. Endbericht von StartClim2021.A in StartClim2021: Handeln und Aktivieren. Wien. Online verfügbar unter: <https://forschung.boku.ac.at/en/publications/147112>.
- UNEP (2011): Towards a Green Economy. Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. A Synthesis for Policy Makers.
- UNEP (2017): Resource Efficiency. Potential and Economic Implications. International Resource Panel Report.
- United Nations (2015): Transforming our World. the 2030 Agenda for Sustainable Development. Working Papers. id:7559. : eSocialSciences. Online verfügbar unter: <https://ideas.repec.org/p/ess/wpaper/id7559.html>.
- van Soest, Heleen L.; van Vuuren, Detlef P.; Hilaire, Jérôme; Minx, Jan C.; Harmsen, Mathijs J. H. M.; Krey, Volker; Popp, Alexander; Riahi, Keywan und Luderer, Gunnar (2019): Analysing interactions among Sustainable Development Goals with Integrated Assessment Models. In: Global Transitions 1, S. 210–225. DOI: 10.1016/j.gt.2019.10.004.
- van Zanten, Jan A. und van Tulder, Rob (2021): Towards nexus-based governance. defining interactions between economic activities and Sustainable Development Goals (SDGs). In: International Journal of Sustainable Development & World Ecology 28 (3), S. 210–226.
- Wiedmann, Thomas O.; Schandl, Heinz; Lenzen, Manfred; Moran, Daniel; Suh, Sangwon; West, James und Kanemoto, Keiichiro (2015): The material footprint of nations. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 112 (20), S. 6271–6276. DOI: 10.1073/pnas.1220362110.