



GWS RESEARCH REPORT 2022/01

Forschungsstand und Literatur zu den volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland

Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland

Britta Stöver

Markus Flaute

Saskia Reuschel

Impressum

KORRESPONDIERENDE AUTORIN

Dr. Britta Stöver

Tel: +49 (541) 40933-250, E-Mail: stoever@gws-os.com

TITEL

Forschungsstand und Literatur zu den volkswirtschaftlichen Folgekosten des Klimawandels in Deutschland – Studie im Rahmen des Projektes Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

VERÖFFENTLICHUNGSDATUM

© GWS mbH Osnabrück, November 2022

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Die in diesem Papier vertretenen Auffassungen liegen ausschließlich in der Verantwortung des Verfassers/der Verfasser und spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung der GWS mbH wider.

DANKSAGUNG

Das Team dankt den Reviewerinnen und Reviewern des Projektes (Dr. Olaf Burghoff, Dr. Horst Gömann, Dr. Markus Groth, Prof. Dr. Dea Niebuhr, Prof. Dr. Annegret Thieken und Dr. Leonie Wenz) für die hilfreichen Anmerkungen und Kommentare.

HERAUSGEBER DER GWS RESEARCH REPORT SERIES

Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH

Heinrichstr. 30

49080 Osnabrück

ISSN 2196-4262

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Methoden und Modelle zur Analyse der Folgekosten des Klimawadels	2
2.1	Überblick	2
2.2	Integrated Assessment Models	4
2.3	Agent Based Models	6
2.4	Stock-Flow Consistent (SFC) System Dynamics	7
2.5	Makroökonomische Modelle mit Input-Output-Tabelle	8
2.5.1	Statische Input-Output Modelle	8
2.5.2	Computable General Equilibrium (CGE) Model	9
2.5.3	Makroökonomische IO-Modelle	12
3	Fazit	15
	Literaturverzeichnis	17

1 EINLEITUNG

Um die Erderwärmung auf möglichst 1,5 Grad zu begrenzen und eine Anpassung an die unvermeidlichen Folgen des Klimawandels zu ermöglichen, bedarf es tiefgreifender Transformationen auf wirtschaftlicher, gesellschaftlicher, kultureller, technologischer und institutioneller Ebene. Um die Übergänge praktikabel und tragfähig zu gestalten, werden Instrumente und Modelle zur Entscheidungsunterstützung benötigt, welche die Komplexität und Interdisziplinarität der einzelnen Ebenen zumindest im Ansatz berücksichtigen (Mathias et al. 2020). Zudem werden die nötigen Änderungen eher mitgetragen, wenn die Kosten des Klimawandels quantifiziert und so deutlich vor Augen geführt werden können.

Es gibt zahlreiche Methoden und Modelle, um den Zusammenhang zwischen Klimawandel, Politikmaßnahmen und Wirtschaft darzustellen. Dabei zielen die unterschiedlichen Methoden auf die Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen ab. Die Wahl eines Modells hängt damit auch wesentlich von der Zielstellung der (politischen) Entscheidungsträger ab, d. h. was der Fokus ist und welche Aspekte des Klimawandels genau untersucht werden sollen (Finnveden und Moberg 2005).

Diese Veröffentlichung erscheint im Kontext des Projekts „Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland“, welches das Ausmaß vergangener und zukünftiger Kosten des Klimawandels sichtbar machen soll. Der Untersuchungsfokus liegt auf der Wirtschaftsstruktur in Deutschland, d.h. nationale Effekte des Klimawandels auf Sektoren, Wirtschaftszweige, Haushalte, soziale Ungleichheiten etc. Direkte und indirekte mittel- bis kurzfristige Auswirkungen sollen gezeigt und in einen Gesamtzusammenhang gesetzt werden. Dadurch können einige Modellansätze bereits ausgeschlossen werden, auch wenn sie für die Analysen zu Klimawandelfolgen relevant sind und als Grundlage für z.B. Szenario-Einstellungen dienen können. Hier nicht betrachtete Modelle sind unter anderem kleinräumige Modelle mit regionalem Fokus, Bottom-up Modelle, welche z.B. die Arbeitsweise in Industrien oder Stromnetze abbilden, Panel-Regressions-Analysen, Kosten-Nutzen-Rechnungen, der Synthetic Control Ansatz, mit dem z.B. die Langfristfolgen von Extremereignissen berechnet werden können oder Klimamodelle, welche nur biophysikalische Größen und Zusammenhänge ausweisen.

Das vorliegende Papier stellt den aktuellen Forschungsstand zu Modelltypen dar, welche die Gesamtwirtschaft und die direkten und indirekten Folgen des Klimawandels auf sektoraler und sozioökonomischer Ebene in Form von Kostengrößen abbilden können. Im nächsten Abschnitt wird erst ein Überblick über relevante Modelltypen gegeben. Anschließend werden die einzelnen Modellarten mit ihren Vor- und Nachteilen genauer vorgestellt und Beispiele für die Anwendung zur Bestimmung der Klimakosten mit deutschem Kontext gegeben. Die Analyse schließt mit einem Fazit, welchem Modelltyp zur Analyse von Klimawandelkosten der Vorzug gegeben werden sollte.

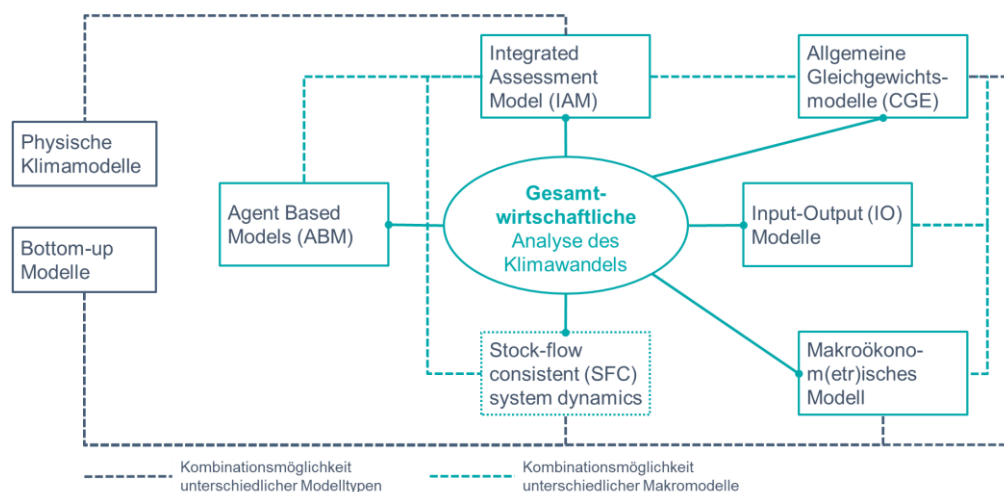
2 METHODEN UND MODELLE ZUR ANALYSE DER FOLGEKOSTEN DES KLIMAWADELNS

2.1 ÜBERBLICK

Generell werden vier grundsätzliche Modelltypen mit gesamtwirtschaftlichen Bezug angewendet: Integrated Assessment Model (IAM), Agent Based Model (ABM), Stock-Flow Consistent (SFC) Systems Dynamics sowie (static / dynamic) Input-Output (IO) Model. Daneben gibt es auch noch eine Reihe von rein physischen globalen Klimamodellen und sehr kleinräumigen, hochdetaillierten bottom-up Modellen, die hier aber aufgrund ihres fehlenden Bezugs zur Gesamtwirtschaft nicht näher betrachtet werden. Beide Modelltypen können aber durchaus Teil von größeren gesamtwirtschaftlichen Modellen sein bzw. mit diesen kombiniert werden.

Die Abgrenzungen zwischen diesen Modellierungsansätzen sind nicht immer trennscharf und es gibt auch Mischformen, bei denen unterschiedliche Ansätze in einem Modell verbunden werden (siehe Abbildung 1). Tabelle 1 fasst die Kennzeichen und Anwendungsgebiete der aufgezählten Methoden zusammen und gibt Hinweise zu Literatur, die einen guten Überblick bietet. In den folgenden Abschnitten wird eine Einführung in die zugrundeliegende Systematik, Funktionsweise und modelleigenen Stärken/Schwächen gegeben.

Abbildung 1: Überblick über Modelltypen zur Beurteilung der Klimawandelfolgen für die Gesamtwirtschaft und ihre Kombinationsmöglichkeiten



Quelle: Eigene Auswertung und Abbildung basierend auf der unten angegebenen Literatur.

Tabelle 1: Überblick über Methoden und Anwendungsgebiete

Methodik	Kennzeichen	Andwendungsgebiet	Literatur
Integrated Assessment Models (IAM)	Wechselwirkungen zwischen wirtschaftlichen und biophysikalischen Systemen Schadensfunktionen Meist global (Weltregionen) Ökonomischer Kern kann auf komplexen makroökonomischen Modell wie allgemeines Gleichgewichtsmodell (CGE), Agent Based Model (ABM), System Dynamics oder makroökonomischen Modell basieren	(soziale) Kosten der Erderwärmung Nutzen-Kosten-Analysen Bewertung und Ermittlung optimaler Politikmaßnahmen (climate change mitigation analysis) Klimafolgenabschätzung	Clarke et al. (2014), Reilly et al. (2012), Weyant (2017), Mendelsohn (2020) Grubb et al. (2021)
Agent Based Models (ABM)	Mikroökonomisch, bottom up Heterogenität Vernetzte direkte Interaktionen Keine Gleichgewichtsbedingungen Imperfekte Märkte, imperfekte Informationen und eingeschränkte Rationalität Kipppunkte und Übergänge zwischen Systemen Schadensfunktionen	Analyse von Klimaverhandlungen und Koalitionsbildungen Analyse der makroökonomischen Auswirkungen des Klimawandels Funktionsweise des Energiesektors Analyse zum Prozess des technologischen Wandels Abschätzung von Politikmaßnahmen mit Bezug auf Klimawandel Analyse von klimabedingten Wanderungen	T. Balint et al. (2017)
Stock-Flow Consistent (SFC) system dynamics	angewandtes, strukturelles makroökonomisches Modell Gesamtrechnungszusammenhänge (inkl. Social Accounting Matrix und Flow of Funds) post-keynesianische Verhaltensannahmen	Pfade/Bedingungen für eine nachhaltige Ökonomie ecological macroeconomics (green/post growth)	Caverzasi und Godin (2015)
(Statische) Input Output (IO)-Modelle (Input-Output-Analyse)	Input-Output-Tabelle (IOT) Emissionskoeffizienten Nachfrageseitig Keine Ressourcenbeschränkungen/-knappheiten Linearität Kurzfristiger Beobachtungshorizont	Folgenabschätzung von Extremereignissen und Klimawandel Emissionsintensitäten Quantifizierung des ökologischen Fußabdrucks Treiber von CO ² Emissionen	Finnveden und Moberg (2005)
Dynamische Input-Output-Modelle: CGE	Input-Output-Tabelle (IOT), Social Accounting Matrix (SAM), Emissionskoeffizienten Volkswirtschaftliche und ökologische Gesamtrechnungen Neoklassischer Ansatz: Gleichgewicht und Markträumung mit konstanten Skalenerträgen, vollständigem Wettbewerb, vollständiger Information, rationalen Agenten, keiner unfreiwilligen Arbeitslosigkeit exogener oder teil-endogener technischer Fortschritt (über Learning-by-Doing Annahmen) Maximierung der sozialen Wohlfahrt Nichtlinear: Reaktion auf Preisänderungen, Input- und Imports substitutionen Langfristiger Beobachtungshorizont	Extremereignisabschätzung Integrierte Bewertung von Politikmaßnahmen Klimafolgenabschätzung Analyse des langfristigen Energie-Umwelt-Wirtschaft Zusammenspiels	Finnveden und Moberg Finnveden und Moberg (2005), Ciarli und Savona (2019) Faehn et al. (2020)
Dynamische Input-Output-Modelle: Makroökonomische Modelle	Input-Output-Tabelle (IOT), Emissionskoeffizienten Volkswirtschaftliche und ökologische Gesamtrechnungen Ökonometrisch bestimmte Verhaltensgleichungen Nichtlinearität: Mengen- und Preisreaktionen Vollständige Integration Endogene technologische Veränderungen, unvollkommener Wettbewerb, teilweise rigide Preise	Extremereignisabschätzung Integrierte Bewertung von Politikmaßnahmen Klimafolgenabschätzungen Vorausberechnungen, Projektionen Forschungsfragen	Cambridge Econometrics (2019), Costa et al. (2016), Lehr et al. (2020)

2.2 INTEGRATED ASSESSMENT MODELS

Die Strukturen der derzeit existierenden, im Detailgrad durchaus sehr unterschiedlichen, Integrierten Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models, IAMs) sind im Allgemeinen darauf ausgerichtet, die Wechselwirkungen zwischen wirtschaftlichen und biophysikalischen Systemen zu verstehen (Mathias et al. 2020). IAMs werden als Entscheidungshilfen und Informationsinstrument für die Politik zur Gestaltung und Bewertung klimapolitischer Lösungen eingesetzt. Vor allem im Zusammenhang mit Analysen zum Klimaschutz, zur Klimafolgenabschätzung und für integrierte Analysen von Klimafolgen und Klimawandelabschwächung werden Detailed Process IAMs verwendet (Weyant 2017).

Laut Ciarli und Savona (2019) fassen Stern und Pindyck den linearen Kreislauf von IAMs, der die Beziehung zwischen Umwelt, sozialen Faktoren und Wirtschaft stilisiert wiedergibt, in die folgenden Schritte zusammen: (1) Konsum und Produktion verursachen Treibhausgase (GHG); (2) Die Treibhausgase sammeln sich in der Atmosphäre an; (3) Dieser wachsende Treibhausgasbestand absorbiert Hitze in der Atmosphäre, wodurch nur ein Teil der von der Sonne auf der Erde reflektierten Licht- und Wärmeenergie wieder entweichen kann und so zur globalen Erderwärmung mit einer bestimmten Rate führt; (4) Die Erwärmung führt zu Klimawandel; (5) Der Klimawandel nimmt über eine Schadensfunktion Einfluss auf Individuen und die Umwelt. Die genauen Auswirkungen sind komplex und schwer abzuschätzen; (6) Bestand und Flüsse von Treibhausgasen können zu bestimmten Kosten reduziert werden. Die Kosten sind abhängig von den gegenwärtigen und zukünftigen Kosten des Klimawandels, den aktuellen Kosten zur Abschwächung des Klimawandels sowie Zeitpräferenzen.

IAMs unterscheiden sich merklich im Detailgrad, in der Komplexität und in den berücksichtigten Verflechtungen (Weyant 2017; Lamperti et al. 2018): Einige Modelle stellen mit einer kleinen Anzahl relativ einfacher Gleichungen das vollständige Erdsystem dar (Nordhaus 2014), während andere aus tausenden physikalischen, chemischen, biologischen und ökonomischen Gleichungen bestehen (Reilly et al. 2012). Der ökonomische Teil der integrierten Bewertungsmodelle (IAMs) basiert überwiegend auf einem CGE-Ansatz (Allgemeines Gleichgewichtsmodell, s. Abschnitt 2.5.2) (Balint et al. 2017). Es gibt zwei grundlegende Arten von globalen IAMs: detailed process (DP) IAMs und benefit–cost (BC) IAMs (Weyant 2017). DP IAMs sind stärker disaggregiert und liefern detaillierte Projektionen hinsichtlich der Folgen des Klimawandels auf regionaler und sektoraler Ebene, wobei sowohl wirtschaftliche Einheiten als auch physische Einheiten zur Ergebnisdarstellung verwendet werden (Weyant 2017). Im Gegensatz dazu werden in BC IAMs die Kosten und Auswirkungen des Klimaschutzes nach Sektoren und Regionen in einzelnen wirtschaftlichen Kennzahlen zusammengefasst (Weyant 2017).

Die Einschränkungen von IAMs liegen darin, dass die Treiber des Wirtschaftswachstums unabhängig vom Klimawandel exogen vorgegeben werden, es keine Unsicherheit gibt, die Annahmen zur Wohlfahrt auf der Einschätzung zu Risikofreudigkeit und der Diskontierungsrate basieren sowie nur eine geringes Augenmerk auf den technologischen Wandel gelegt wird, der aber einen hohen Einfluss auf den Verbrauch zukünftiger Ressourcen und Emissionen hat (Ciarli und Savona 2019). Kritikpunkte sind, dass

- die Schadensfunktionen und Diskontraten willkürlich gesetzt sind (u. a. Pindyck

2013; Stern 2013, 2016; Weitzman 2013; Revesz et al. 2014; Farmer et al. 2015; Balint et al. 2017),

- die aggregierte Schadensfunktion nicht zwischen verschiedenen mikroökonomischen Wirkungskanälen unterscheidet (Lamperti et al. 2020),
- die Kosten für Emissionssenkungen zeitlich unabhängig von vergangenen Emissionsniveaus sind (Grubb et al. 2021),
- der Eindruck von Kontrolle vermittelt werden könnte (u. a. Ackerman et al. 2009; Pindyck 2013; Stern 2013; Weitzman 2013; Revesz et al. 2014; Farmer et al. 2015),
- die Grundsätze eines funktionierenden Sozialsystems und die Verhaltensweisen der beteiligten Akteure kaum Beachtung finden (Mathias et al. 2020),
- sowohl die Kosten des Klimawandels als auch die Vorteile des Übergangs zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft unterschätzt werden können (Stern 2016) und
- es keine Rückkopplungsschleifen und klimapolitische Reflexivität gibt (Balint et al. 2017).

Eine Auswahl bekannter IAM ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Bekannte Integrated Assessment Modelle (Auswahl)

Modell	Referenz
DICE	Nordhaus 2013; Nordhaus und Sztorc 2013; Nordhaus 2014; Nordhaus 2017
RICE	Nordhaus und Yang 1996; Nordhaus 2013; Dennig et al. 2015
FUND	Anthoff und Tol 2014; Costa et al. 2016
(AD-)WITCH	Bosetti et al. 2006; Emmerling et al. 2016
CLIMSAVE	Harrison et al. 2013; Harrison et al. 2015; Mokrech et al. 2015; Harrison et al. 2016
(RE)MIND	Edenhofer et al. 2006; Leimbach et al. 2010a; Leimbach et al. 2010b; Klein et al. 2014; Bauer et al. 2016
MIT IGSM	Sokolov et al. 2005; Prinn 2013; Sokolov et al. 2018
WIAGEM	Kemfert 2002

In Szenarien-Rechnungen werden vor allem Annahmen zu Treibhausgasemissionen und sozioökonomischen Entwicklungen gesetzt. Die Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen basieren überwiegend auf den Projektionen des IPCC, den „Representative Concentration Pathway“ (RCP, häufig RCP4.5 und RCP8.5). Für die sozioökonomischen Entwicklungen werden meist die Projektionen der IIASA (SSP-Szenarien) zugrunde gelegt, welche als Narrativ auch in die RCPs eingehen.

In den meisten IAMs werden infolge der Komplexität und des globalen Charakters und Untersuchungsfokus nur Weltregionen modelliert. Deutschland ist fast immer Teil der Region Europa, weshalb es selten explizite Ergebnisse für Deutschland gibt.

Das Modell **D.Climate** (Deloitte Economics Institute 2021) ist ein globales Modell mit Ländergruppen, das bei Bedarf auf einzelne Länder zugeschnitten wird. Für Deutschland

wurde eine Szenarioanalyse zu Folgen des Klimawandels, d.h. die Kosten fehlender Politikmaßnahmen und die Vorteile von Schutz- und Anpassungsmaßnahmen, durchgeführt (Philip et al. 2021). Dabei wird ein Klimawandel-Szenario, das auf SSP2 (mittlere Entwicklung) und RCP6.0 (Wirtschaftliche Entwicklung ohne weitere signifikante Klimaschutzmaßnahmen) basiert, mit einem Verlauf ohne Klimawandel verglichen. Es wird nach sechs Schadensarten unterschieden, die auf unterschiedliche Komponenten des BIPs und zehn Wirtschaftssektoren verteilt werden. Die Ergebnisse werden als Netto-Ist-Werte ausgewiesen, d.h. die zukünftigen Kosten wurden mit einer Rate von 2% auf einen heutigen Wert abdiskontiert. Die Autoren weisen für den Zeitraum 2020 bis 2070 klimawandelbedingte Verluste im BIP in Höhe von 730 Mrd. Euro (in heutigen, mit 2% abdiskontierten Preisen) aus. Für das Jahr 2070 würde sich ein Verlust von 70 Mrd. Euro oder 1,2% des BIP ergeben.

Das Modell **ASTRA** ist ein Integrated Assessment Model mit System Dynamics Kern, das sich aus neun verschiedenen Modulen zusammensetzt, die jeweils unterschiedliche Aspekte genauer darstellen wie z. B. die Ökonomie (inkl. Input-Output-Verflechtungen), Transportnachfrage oder Fahrzeugflotte (<http://www.astra-model.eu>, Kunze und Schreiber 2021). ASTRA umfasst 27 EU Staaten sowie Großbritannien, Norwegen und die Schweiz. Das ökonomische Modul basiert auf Input-Output-Tabellen und bildet 25 Sektoren ab. Zudem gibt es mit ISI-Makro bzw. **ASTRA-DE** ein Ein-Regionen-Modell für Deutschland, das einen höheren Detailgrad bei abgebildeten Sektoren (57) und geographischen Räumen (NUTS 2 bzw. 39 Regionen) aufweist. Allerdings sind aktuelle Anwendungen des Deutschlandmodells gegenwärtig nicht bekannt.

Das Modell **WIAGEM** wurde ebenfalls schon zur Berechnung der Klimakosten für Deutschland herangezogen (Kemfert 2007). WIAGEM bildet 11 Handelsregionen und 14 Sektoren ab und basiert auf dem GTAP Datensatz Version 4 und 5 (Kemfert 2002). Die ökonomischen Modellbeziehungen basieren auf einem CGE. Die wirtschaftlichen Schäden ergeben sich anhand von spezifischen Schadensfunktionen und durch die sektoralen Effekte aufgrund der sektoralen Verflechtungen. In einer Modellrechnung zu den Klimawandelkosten aus Kemfert (2007) für Deutschland ermittelt die Autorin bis 2050 Klimafolgekosten in Höhe von knapp 800 Mrd. Euro, was Wachstumseinbußen von jährlich 0,5 Prozentpunkten entspräche. Aktuellere Berechnungen mit dem Modell liegen nicht vor.

2.3 AGENT BASED MODELS

Nach Balint et al. (2017) gibt es im Bereich der Klimaanalysen vier Anwendungsfelder von Agenten-basierten Modellen (ABMs): (1) Analysen von Klimaverhandlungen und Koalitionsbildungen bzw. Kooperationen (2) Analysen zu makroökonomischen Auswirkungen des Klimawandels (3) Funktionsweise des Energiesektors (Deregulierungen, Preissetzungsverhalten, Technologiemic, Energieeffizienz) sowie (4) Analyse zum Prozess des technologischen Wandels und der Verbreitung von Innovationen. Des Weiteren werden sie nach Zanhoun und Nana (2019) auch gerne zur Analyse von klimabedingten Wanderungen herangezogen.

Bei ABMs wird versucht, die Sozioökonomie realistischer abzubilden, indem die Interaktion vieler verschiedener Agenten in der Wirtschaft simuliert wird (Farmer und Foley

2009; Dosi 2012; Kirman 2016; Stern 2016; Dosi und Virgillito 2021). Makroökonomische ABMs stellen die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Wirtschaftsdynamik auf Mikroebene dar (Moss 2002a; Farmer et al. 2015; Balint et al. 2017). Durch Dynamiken außerhalb des Gleichgewichts und die Integration von Kippunkten bieten sie die Möglichkeit, die Entwicklung von Systemen zu analysieren, die sich ständig im Ungleichgewicht befinden und in denen sich durch kleine endogene Schocks ein über einen langen Zeitraum stabiles Verhalten dramatisch, stochastisch und unumkehrbar ändern und so zu tiefgreifenden Übergängen in sozioökonomischen Systemen führen können (Balint et al. 2017; Lamperti et al. 2018), das heißt emergente Eigenschaften von Systemen werden durch die Systematik von ABMs sichtbar. Mögliche katastrophale Folgen des Klimawandels sowie die Dringlichkeit und Vorteilhaftigkeit politischen Handelns können so eher gezeigt werden (Balint et al. 2017). Zudem können Stakeholder und Politiker durch den höheren Grad an Realitätsbezug leichter in der Szenarioerstellung und -evaluation einbezogen werden (Moss 2002a, 2002b).

Allerdings werden die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels auch bei ABMs über Schadensfunktionen bestimmt. Es wurde festgestellt, dass die Ausgestaltung der Schadensfunktion zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führt, wenn die Erderwärmung über 2 Grad liegt (Covington und Thamotheram 2015). Die Modellergebnisse werden also maßgeblich durch die Wahl der Schadensfunktionen beeinflusst. Ebenfalls nachteilig bei ABMs ist, dass sie durch ihre komplexe Struktur schwer zu kalibrieren bzw. zu schätzen sind (Fagiolo und Roventini 2017).

Bekannte Modelle sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Bekannte Agent Based Models mit Klimabezug

Modell	Referenz
LAGOM models	Mandel et al. 2009; Haas und Jaeger 2005; Wolf et al. 2013; Schütze et al. 2017
MADIAM	Weber 2004; Weber et al. 2005; Hasselmann und Kovalevsky 2013; Kovalevsky und Hasselmann 2014
DSK	Lamperti et al. 2018; Lamperti et al. 2019; Lamperti et al. 2020
MASON 19 framework	Czupryna et al. 2020
ENGAGE	Gerst et al. 2013
εIRIN model	Monasterolo und Raberto 2016
EURACE model	Deissenberg et al. 2008; Holcombe et al. 2013; Ponta et al. 2018

2.4 STOCK-FLOW CONSISTENT (SFC) SYSTEM DYNAMICS

SFC System Dynamics Modelle werden dazu eingesetzt, die sozialen und ökologischen Aspekte einer Volkswirtschaft darzustellen und mögliche Pfade/Bedingungen für eine nachhaltige Ökonomie aufzuzeigen (Jackson et al. 2015). Sie finden deshalb überwiegend im Rahmen von Ökologischer Makroökonomie (ecological macroeconomics) im

Themenkomplex „green growth“ und „post-growth“ Anwendung.

SFC Modelle zählen zur Gruppe der angewandten, strukturellen makroökonomischen Modelle: Sie fußen auf dem detaillierten und präzisen Zusammenspiel von volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungszusammenhängen, welche die Social Accounting Matrix (SAM) und Flow of Funds (FF) accounts mit umfassen, und berücksichtigen Verhaltensannahmen, die von der post-keynesianischen Theorie abgeleitet sind (Berg et al. 2015). Regulär besitzen diese Modelle keinen Input-Output-Kern, d. h. berücksichtigen nicht die Verflechtungsbeziehungen zwischen den Sektoren, sondern betrachten nur einen Produktionssektor bzw. abstrahieren bei mehreren Sektoren deren Verflechtungsbeziehungen (Berg et al. 2015). Technisch gesehen wird ein System aus Bestands-, Fluss- und Hilfsgrößen modelliert, die über Beziehungen Ursachen und Wirkungen mit einander verbinden, d. h. die Bestände verändern sich dabei über Zu- und Abflüsse in den Flussgrößen, die von den Hilfsgrößen beeinflusst werden (Pfaff und Walz 2020). Die Interaktionen zwischen den Größen können dabei von Theorien abgeleitet oder empirisch fundiert sein (Pfaff und Walz 2020). Mathematisch wird über Iterationen approximiert, wobei anders als bei CGEs kein Gleichgewichtszustand erreicht wird (Pfaff und Walz 2020).

Der Anwendungsfokus liegt zum einen auf der Abbildung und Integration der Finanzwirtschaft in ökonomische Modelle, um der Unsicherheit der Finanzmärkte und ihren Einfluss auf die sozioökonomischen Bedingungen Rechnung zu tragen (Jackson et al. 2015). Zum anderen wird die Wirtschaftstätigkeit um Bestände und Ströme natürlicher Ressourcen (die Ökosystemleistungen) ergänzt, um das Zusammenspiel und die Abhängigkeit abzubilden (Jackson et al. 2015). Der Modellrahmen geht auf (Copeland 1949) zurück und wurde von Wynne Godley und anderen weiterentwickelt (Lavoie und Godley 2001; Godley und Lavoie 2007; Lavoie und Zezza 2012).

2.5 MAKROÖKONOMISCHE MODELLE MIT INPUT-OUTPUT-TABELLE

2.5.1 STATISCHE INPUT-OUTPUT MODELLE

Die Input-Output Analyse hat eine lange Tradition: Bereits in den 1970ern wurden die Umweltauswirkungen wirtschaftlicher Aktivitäten von (Leontief 1970) und (Victor 1972) mittels IO-Ansatz untersucht (Garcia-Hernandez und Brouwer 2020). (Statische) Input-Output-Modelle (IO-Modelle) werden zur Untersuchung von Umweltbelastungen, Emissionsintensitäten oder zur Quantifizierung des ökologischen Fußabdrucks von Industrien, Gütern und der Endnachfrage eingesetzt (Garcia-Hernandez und Brouwer 2020). Zudem können damit in Kombination mit der strukturellen Dekompositionsanalyse (structural decomposition analysis, SDA) die Treiber von CO₂-Emissionen identifiziert werden (Su et al. 2021). Auch zur Analyse von Extremereignissen (disaster impact analysis) eignen sich IO-Modelle, da innerhalb einer Region die wirtschaftlichen Abhängigkeiten nachvollzogen werden können und so die Effekte höherer Ordnung (Produktionsverluste, die andere Firmen durch den Ausfall der direkt betroffenen Unternehmen entstehen) genauer abgeschätzt werden können (Okuyama und Santos 2014; Bubeck et al. 2020). Insgesamt ist die Input-Output-Methode ein leistungsfähiges Instrument, um zu beurteilen, wie sich ein Schock in einem oder mehreren Sektoren über die Vorleistungen und die Nachfrage auf die Wirtschaft auswirkt (Haines und Jiang 2001; Okuyama 2004).

Im Mittelpunkt der Input-Output-Analyse steht die Input-Output-Tabelle, welche die Geld- oder Stoffströme zwischen verschiedenen Wirtschaftszweigen beschreibt. Anhand dieser Matrix kann untersucht werden, wie sich Veränderungen der Endnachfrage in der Wirtschaft auf die Gesamtproduktion der einzelnen Wirtschaftszweige auswirken. Die ökologisch erweiterte Input-Output-Analyse ergänzt diese Analyse durch Satellitenkonten (Hardt und O'Neill 2017). Genauer werden Umweltauswirkungen berücksichtigt, indem entweder die rein monetäre IOA durch Emissionskoeffizienten ergänzt wird oder die Input-Output-Tabellen durch physische Tabellen ersetzt werden (Finnveden und Moberg 2005). Die IOA wird in der Regel unter Verwendung beschreibender Daten und Methoden für Bilanzierungszwecke (accounting purposes) angewandt (Finnveden und Moberg 2005).

Die Hauptschwächen des IO-Modells sind, dass zum einen in der Grundform die Produktionskapazität nicht berücksichtigt wird und dadurch die Folgen eines Schocks auf der Angebotsseite ohne Erweiterungen nicht direkt abgeschätzt werden können (Rose et al. 1997; Santos und Haines 2004; Haines et al. 2005; Percoco 2006). Zum anderen lassen IO-Modelle keine Flexibilität im Wirtschaftssystem zu: Durch die zugrundeliegende Linearität, die starren Input- und Imports substitutionen, die fehlende Möglichkeit zur Ressourcenbeschränkung (Garcia-Hernandez und Brouwer 2020) sowie fehlende Reaktionen auf Preisänderungen (Rose 2004) können Produzenten und Verbraucher nicht auf einen Mangel an Inputs reagieren, indem sie beispielsweise alternative Lieferanten finden (Hallegatte 2008). Durch erweiterte Modelle, die auf dem IO-Ansatz basieren, können diese Schwächen umgangen werden (s. Abschnitt 2.5.2 und 2.5.3).

Aktuelle Beispiele für Input-Output Analysen sind Wu und Han (2020), Liu et al. (2020), Eamen et al. (2020), Bubeck et al. (2020) und für Disaster/Pandemic Impact Analysen Okuyama und Santos (2014) sowie Santos (2020).

2.5.2 COMPUTABLE GENERAL EQUILIBRIUM (CGE) MODEL

Allgemeine Gleichgewichtsmodelle (Computable General Equilibrium, CGE) sind ein häufig genutztes Instrument zur Analyse der langfristigen makroökonomischen Entwicklung und dem langfristigen Energie-Umwelt-Wirtschaft Zusammenspiel (Cambridge Econometrics 2019). Sie werden so angepasst und erweitert, dass eine integrierte Bewertung von Politikmaßnahmen zum Klimawandel bzw. Klimafolgenabschätzungen vorgenommen werden können (Boulanger und Bréchet 2005; Finnveden und Moberg 2005).

Das CGE ist ein Simulationsmodell bestehend aus mehreren Märkten/Sektoren, das simultan das Verhalten von einzelnen (repräsentativen) Konsumenten und Firmen als Reaktion auf Preissignale unter der Bedingung von Markt- und Gesamtrechnungs-Gleichgewichten sowie Ressourcenbeschränkungen optimiert (Rose 2004). Zu den typischen Annahmen von CGEs gehören konstante Skalenerträge, vollständiger Wettbewerb in allen Märkten, die Maximierung der sozialen Wohlfahrt (gemessen in diskontiertem Privatkonsum), keine unfreiwillige Arbeitslosigkeit sowie exogener technischer Fortschritt, der einem konstanten Zeittrend folgt. Die Produktionstechnologien werden in der Regel mit konstanten Substitutionselastizitäten (CES, constant elasticities of substitution) modelliert und das Nachfrageverhalten der privaten Haushalte basiert auf dem linear expenditure system (LES) (Faehn et al. 2020). Technologischer Wandel und

Verhaltensänderungen im Energiebereich werden mit einer Mischung aus endogen substituierten Produktionsfaktoren und Konsumgütern, induzierten Änderungen im Energiemix, autonomem Wachstum bei der Gesamtfaktorproduktivität (total factor productivity, TFP) sowie faktorspezifischen Produktivitätsfortschritten (inkl. Energieeffizienzverbesserungen) dargestellt (Faehn et al. 2020). CO₂ und andere Treibhausgase werden meist über feste Verhältnisse zu Energiekoeffizienten in einem Referenzjahr in das Modell integriert (Faehn et al. 2020).

Die komplexen Modelle mit einer hohen Zahl an berücksichtigten Regionen und Industrien werden durch die Abbildung genutzter Energiequellen und Emissionen mit der Umwelt verbunden (Ciarli und Savona 2019). Im Gegensatz zu einfachen IO-Modellen sind CGE-Modelle in der Regel nichtlinear, können auf Preisänderungen reagieren, Input- und Imports substitutionen berücksichtigen und explizit mit Angebotsbeschränkungen umgehen (Okuyama und Santos 2014). Als Simulationsmodell kann das CGE-Modell katastrophenspezifische Merkmale als endogene Funktion integrieren, wie etwa die Resilienz (Rose und Liao 2005).

Die Schwächen von CGEs liegen darin, dass viele wichtige Einflussgrößen einer umweltbewussteren Konsum- und Produktionsstruktur nicht endogen angestoßen werden können (Ciarli und Savona 2019): die kalibrierten Input-Output-Koeffizienten sind meistens fix und können sich nicht durch Änderungen in der Arbeitsteilung, z.B. bedingt durch umweltbewusste neue Technologien, verändern. Auch die Vorleistungszusammensetzung verändert sich meist nur in Abhängigkeit der Modellierung von Learning by Doing und technologischen Wandel und ist dadurch losgelöst von Änderungen in Treibhausgasemissionen der einzelnen Industrien, wodurch Änderungen in der Energieeffizienz und den Treibhausgasemissionen nur indirekt abgebildet werden können. Die Konsumpräferenzen unterschiedlicher Haushaltstypen sind unabhängig von Zeit, Sättigung und neuen (umweltfreundlicheren) Gütern, sodass sich Konsummuster allein in Abhängigkeit zum Einkommen ändern. Bei der Bewertung von Extremereignissen ist nachteilig, dass sich die Modellelastizitäten zwar an die besonderen Bedingungen von Katastrophenfolgen anpassen, die Markträumungshypothese aber nur über längere Zeiträume gültig ist, d. h. die Untersuchungszeiträume müssen sehr lang sein (Hallegatte 2008). Die unmittelbaren Folgen in den Monaten nach einem Extremereignis können dadurch nicht direkt abgeschätzt werden, da die Knappheiten im Anschluss an eine Katastrophe eher durch Rationierung als durch Preiserhöhung und Substitution bestimmt werden (Hallegatte 2008). Der Gleichgewichtszustand, der sich aus den optimalen Entscheidungen und dem vollständigen Wissen der Agenten ergibt, ist ebenfalls ein wesentlicher Nachteil der CGEs. Vor allem bei der Analyse von Extremereignissen wird der Verlust dadurch unterschätzt, d. h. die Schadensmessung fällt als Modellergebnis stets niedriger aus als in den Referenzdaten (Tsuchiya et al. 2007). Genauer kann durch die Bemessung von Flussgrößen der volle Umfang aller Einflüsse nicht ermittelt werden. Dazu gehören die langfristigen Folgen für das Wirtschaftswachstum, psychologische Auswirkungen, das Ausmaß einer Verschlechterung der öffentlichen Gesundheit, persönliche Verluste sowie Beeinträchtigungen beim Lebensunterhalt (Pelling et al. 2002). Zudem können die kurzfristigen Gesamteffekte des Extremereignisses durch die Wiederherstellungs- und Wiederaufbaumaßnahmen sehr niedrig bzw. positiv ausfallen; Die eigentlichen Kosten, die sich erst langfristig zeigen, werden dadurch kaum berücksichtigt

(Okuyama und Santos 2014, S. 5). Weiterhin abstrahieren viele CGEs von den institutionellen Details zur Bildung und zum Umlauf von Geld, obwohl sie von zentraler Bedeutung für die Entwicklungen und Dynamiken in der realökonomischen Welt sind (Berg et al. 2015).

Eine spezielle Gruppe von Gleichgewichtsmodellen sind Dynamische stochastische allgemeine Gleichgewichtsmodelle (DSGE-Modelle). Nach Ansicht etwa der Deutschen Bundesbank (Hinterlang et al. 2021) können auch diese Modelle für die Analyse der gesamtwirtschaftlichen Effekte der Klimapolitik und des Klimawandels eingesetzt werden. Traditionell werden diese Modelle häufig von Notenbanken zur Betrachtung kurzfristiger gesamtwirtschaftlicher Entwicklungen, Konjunkturanalyse und Mittelfristanalyse und weniger zur Analyse von Wirtschaftsstrukturen und sehr langfristigem Strukturwandel eingesetzt. Mittels Erweiterungen lassen sich aber Effekte von Wetterextremen und von Klimapolitik auch im Rahmen von DSGE-Modelle untersuchen (Hinterlang et al. 2021). Ein Beispiel ist das Mehrsektoren-Umwelt-DSGE-Modell EMuSe, das von der Bundesbank auf Basis bestehender DSGE-Modelle entwickelt wurde (Hinterlang et al. 2021). Gleichwohl beruhen die Modelle auf einer Reihe strenger Annahmen wie dem rationalen Handeln repräsentativer Haushalte und Unternehmen bei vollkommener Voraussicht. Zudem haben sie bei der Abbildung nichtökonomischer Instrumente zum Klimaschutz, die bisher zumindest auf nationaler Ebene gegenüber Preisinstrumenten eindeutig überwiegen, und der Erfassung von differenzierten Wirkungen des Klimawandels Schwierigkeiten, während Strukturmodelle wie CGE-Modelle oder makroökonomische Modelle hierfür schon länger eingesetzt werden und z.B. Effekte des Klimawandels sehr differenziert erfassen (z.B. Feyen et al. 2020).

Bekannte CGE-Modelle und dazugehörige Dokumentationen sind exemplarisch in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Bekannte, ausgewählte CGE Modelle

Modell	Referenz
GEM-E3	Joint Research Centre et al. 2013; Capros et al. 2017; Weitzel et al. 2019
COIN	Steininger et al. 2015; Steininger et al. 2016
DART	Klepper et al. 2003; Klepper und Peterson 2004; Weitzel 2010; Delzeit et al. 2021
ENV-LINKAGES	Château et al. 2014; OECD

In Szenarien-Rechnungen werden anders als in den IAMs keine Annahmen zum Klima und zu den Treibhausgasen getroffen, sondern die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels werden in ökonomische Größen übersetzt. Die Wirkungen von z.B. einer Dürre infolge des Klimawandels werden also aus beobachtbaren Ereignissen der Vergangenheit oder aus IAM-Modellergebnissen für die Zukunft abgeleitet und als Ertrags-einbußen in der Landwirtschaft in den Modellzusammenhang als Input-Größe eingesetzt. Als Ergebnis weist das Modell dann die Folgen dieses Ereignisses für die Gesamtwirtschaft, einzelne Sektoren, Preise und andere ökonomische Größen aus. Die

Szenarien-Modellierung erfolgt also indirekt. Der Vorteil dieser Modellierungsart gegenüber den IAMs liegt im hohen sektoralen Detailgrad, der sektoralen Verflechtung und den sektoralen Interdependenzen. Dadurch können ganze Wirkungsketten im Modellzusammenhang nachvollzogen werden und neben den direkten Effekten (im oben genannten Beispiel Preissteigerungen für landwirtschaftliche Produkte) auch indirekte Effekte (z.B. Preissteigerungen bei Nahrungsmitteln) und langfristige Effekte (Verhaltensänderungen im Konsum privater Haushalte) gezeigt werden.

Durch die weite Verbreitung, Akzeptanz und Anwendung der CGEs zur Analyse von Politikszenerarien sowie eine starke Community (GTAP), gibt es auch für Deutschland zahlreiche Modelle, allerdings mit unterschiedlichem Detailgrad und Fokus.

Das Modell **COIN-INT** ist ein multi-regionales globales CGE, das auf GTAP Daten basiert und 24 Regionen sowie 23 Sektoren ausweist. Es wird zur Abschätzung der langfristigen Folgen der graduellen Veränderungen des Klimawandels und der Klimarisiken sowie in den Bereichen Politikberatung, Klimawandelanpassung sowie Umwelt- und Ressourcenmanagement eingesetzt (Peter et al. 2020). In Peter et al. (2020) werden die Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland quantifiziert. Die Autoren zeigen, dass durch globale klimawandelbedingte Veränderungen der Arbeitsproduktivität, der landwirtschaftlichen Erträge sowie des Meeresspiegels alle Weltregionen negativ vom Klimawandel betroffen sind, was sich auch in einer Veränderung der Handelsströme äußert. Für Deutschland resultieren alleine aus diesen globalen Effekten Verluste im BIP in Höhe von 0,01% bis 0,35%.

Das **GEM-E3**-Modell ist ein multiregionales, multisektorales, rekursives, dynamisches, berechenbares allgemeines Gleichgewichtsmodell (CGE), das von der Europäischen Union zur Bewertung von Politikmaßnahmen und zur Folgenabschätzung des Klimawandels eingesetzt wird (Capros et al. 2017). Das Modell besteht aus verschiedenen Modulen, wodurch zwischen verschiedenen Schließungsmöglichkeiten und institutionellen Marktregimen gewählt werden kann. Es enthält 38 Weltregionen und 31 Sektoren. Im Projekt PESETA wurden die Folgen des Klimawandels für Europa quantifiziert (Ciscar 2009; Ciscar et al. 2012). Nach Angaben von Hirschfeld et al. (2015, S. 8) „[schätzt] das europäische PESETA-Projekt (Ciscar et al. 2009) [...] die auf Deutschland in den Jahren bis 2080 zukommenden Kosten durch Klimaschäden je nach Klimaszenario auf jährlich 0,3 bis 0,75 Prozent des Bruttoinlandsproduktes (BIP), was bezogen auf das heutige [2014] BIP in Deutschland zwischen 8 und 21 Mrd. € pro Jahr entsprechen würde“.

2.5.3 MAKROÖKONOMETRISCHE IO-MODELLE

Makroökonomische IO-Modelle mit Energie- und Emissionsmodulen finden bei der integrierten Bewertung von Politikmaßnahmen, Projektionen und einer Vielzahl von Forschungsfragen Einsatz (Cambridge Econometrics 2019). Letztere umfassen auch die Abschätzung von Extremereignissen und die Klimafolgenabschätzung (Lehr und Nieters 2015; Lehr et al. 2016; Lehr et al. 2020; Fazekas et al. 2021).

Makroökonomische IO-Modelle abstrahieren von rigiden Theorieannahmen und setzen den Fokus auf empirisch beobachtbare Verhaltensweisen aus der Vergangenheit (Lehr und Lutz 2020)(Lehr und Lutz 2020). Die Zusammenhänge zwischen Gesellschaft

und Wirtschaft werden also über Schätzgleichungen in einem Computersystem repräsentiert. Dies ist der wesentliche Unterschied zu CGE-Modellen, welche auf der neoklassischen Theorie basieren. So sind die Märkte in makroökonomischen IO-Modellen in der Regel nicht geräumt, es treten Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage auf, die eher durch Mengen- als durch Preiseffekte ausgeglichen werden, und es besteht die Möglichkeit von freiwilliger Arbeitslosigkeit (Kemmler et al. 2020). Weitere wesentliche Merkmale des ökonomischen Kerns sind die hohe Disaggregation in verschiedene Sektoren und Wirtschaftszweige, die Abbildung der Verflechtungen und Abhängigkeiten untereinander durch die Einbindung der Input-Output-Tabelle, eine bottom-up Modellierung und Nicht-Linearität (Cambridge Econometrics 2019; Ulrike Lehr und Christian Lutz 2019; Lehr et al. 2020). Für die Erfassung der Umwelteffekte wird der ökonomische Kern um detaillierte Module zu Energie, Rohstoffnutzung, Emissionen, Verkehr etc. ergänzt (Cambridge Econometrics 2019; Ulrike Lehr und Christian Lutz 2019; Lehr et al. 2020).

Die Schwäche von makroökonomischen IO-Modellen liegt in ihrem ökonometrischen Kern begründet: Für valide Schätzergebnisse werden lange und qualitativ hochwertige Zeitreihen benötigt (Cambridge Econometrics 2019). Zudem bieten die Schätzergebnisse nur eine Grundlage für die Fortschreibung regulärer Verläufe; Zukünftige Extremereignisse können in der Projektion aus den Schätzungen heraus nicht angezeigt werden, da sie durch ihr unregelmäßiges und meist einzigartiges Auftreten in die Störgröße der Schätzgleichungen eingehen (Avelino und Dall'Erba 2019). Zukünftige Extremereignisse können daher nur als gesetzte Annahme in das Modell eingebaut werden.

Bekannte makro-ökonomische Modelle und dazugehörige Dokumentationen bzw. Referenzen sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Bekannte makro-ökonomische Input-Output-Modelle

Modell	Referenz
E3ME	Cambridge Econometrics 2019
LIFT	Industrial Economics Incorporated (IEc) und Interindustry Economic Research Fund (IERF) 2015
INFORGE/PANTA RHEI	Lehr et al. 2016; Lehr et al. 2020; Becker et al. 2022

Bei Szenarien-Rechnungen werden wie bei den CGEs die erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in ökonomische Größen übersetzt und in das Modell aufgenommen. Auch hier liegt der Vorteil dieser Modellierungsart gegenüber den IAMs im hohen sektoralen Detailgrad, der sektoralen Verflechtung und den sektoralen Interdependenzen, wodurch sich ganze Wirkungsketten im Modellzusammenhang nachvollziehen lassen.

Für Deutschland gibt es das Modell (INFORGE) **PANTA RHEI**, ein makroökonomisches, interdependentes Input-Output-Modell mit zahlreichen detaillierten Komponenten zu Wohnungsbestand, Bevölkerungsstruktur- und -entwicklung, Fahrzeugflotte, Energieverbrauch, Emissionen etc. Es werden u.a. 63 Wirtschaftszweige, 47 Konsumverwendungszwecke und 10 Ausgabenbereiche des Staates detailliert modelliert und ausgewiesen. Das Modell wird für Szenarien-Rechnungen und Politiksimulationen eingesetzt,

z.B. zur Bewertung von Klimawandelfolgen, des Ausbaus Erneuerbaren Energien oder von Energiepreisen. Im Projekt econCCadapt wurden die klimawandelbedingten Schäden durch Extremwetterereignisse bis 2050 jährlich zwischen 1,75 Mrd. Euro und 19,5 Mrd. Euro geschätzt, d.h. pro Jahr fällt das BIP um durchschnittlich 0,1% bis 0,6% niedriger aus (Lehr und Nieters 2015; Lehr et al. 2016).

3 FAZIT

Wenngleich Deutschland derzeit nur einen vergleichsweise kleinen Anteil zu den weltweiten Emissionen beiträgt und die direkte Einflussnahme auf das Klima begrenzt ist, ist andererseits die historische Verantwortung der bereits freigesetzten Treibhausgase zu berücksichtigen. Zudem ist zu bedenken, dass die Treibhausgasemissionen in Deutschland mit 9,2 Tonnen pro Kopf über dem globalen Durchschnitt liegen, der ungefähr 7,5 Tonnen beträgt. Das Heranziehen eines IAMs mit vollständigem Klimamodell in Kombination mit makroökonomischen Welthandelsmodellen ist vor dem Hintergrund der deutschen Perspektive zwar denkbar, würde aber den Schwerpunkt der Forschungsfrage nach den nationalen klimawandelbedingten Kosten nicht direkt treffen. Vielmehr ist eine detaillierte Abbildung der Wirtschafts-, Konsum- und Beschäftigungsstrukturen und deren Zusammenhänge für ein Aufzeigen der direkten und indirekten kurz- und mittelfristigen Effekte des Klimawandels auf nationaler Ebene wichtig. Bei der Bewertung der Kosten sollte es zudem möglich sein, Größen jenseits des BIPs mit einzubeziehen, welche Disparitäten und Ungleichheit sowie Nachhaltigkeit in der Gesellschaft abbilden.

Dazu eignen sich vor allem makroökonomische Input-Output-Modelle wie CGE oder makroökonomische Modelle. Beide Modelltypen wurden bereits zur Abschätzung der Folgekosten des Klimawandels eingesetzt und haben sich bewährt. Jedoch muss bei CGEs stets beachtet werden, dass sie auf einem sehr restriktiven theoretischen Grundgerüst aufbauen und Gleichgewichtspfade unterstellt werden, welche bei der Interpretation der Ergebnisse zumindest berücksichtigt werden sollten. Ökonometrisch fundierte Modelle bieten den Vorteil, dass sie nicht zwingend einer wirtschaftlichen Theorie folgen müssen, sondern Entwicklungen aus der Vergangenheit heraus über Schätzgleichungen erklären und in die Zukunft fortschreiben. Im Vergleich dazu werden die Parameter in CGEs häufig an einen gegebenen Referenzwert kalibriert oder aus bestehender Literatur übernommen (Peichl 2005). Während die Preise in CGEs zudem Gleichgewichtspreise darstellen, bestimmen sie sich in makroökonomischen Modellen aufgrund von Marktunvollkommenheiten (unvollständiger Wettbewerb, partiell starre Preise, Abhängigkeiten) und beschränkten Informationen der Wirtschaftssubjekte durch stückkostenbasierte Mark-Up-Preissetzung (Becker et al. 2022). Auch die Annahme rationaler Erwartungen und vollkommener Voraussicht bei CGEs ist aufgrund der inhärenten Unsicherheit der Wirkungen des Klimawandels (z.B. wann entsteht wo ein Extremwetterereignis) gerade über lange Zeiträume wenig realitätsnah. Zudem ist davon auszugehen, dass Wirtschaftssubjekte ihr Verhalten ändern werden, wenn Klimaschutz als unumkehrbar wahrgenommen wird und das Wissen um Wirkungen des Klimawandels konkreter wird. Bei beiden Modelltypen wird der Klimawandel indirekt durch Setzung von Schätzannahmen in das Modell integriert.

Im Rahmen des Projekts Kosten durch Klimawandelfolgen in Deutschland wird in Arbeitspaket 3.2 eine ex-ante Untersuchung zu den „Volkswirtschaftliche Folgekosten durch Klimawandel“ durchgeführt. Hierfür ist eine detaillierte Modellierung nach unterschiedlichen Sektoren sinnvoll und notwendig, weil die Sektoren unterschiedlich vom Klimawandel, aber auch von Anpassungsmaßnahmen betroffen sind. Schadensereignisse unterscheiden sich ebenso wie Anpassungsmaßnahmen stark in ihrer Sektorstruktur. Verhaltensparameter sollten ökonometrisch geschätzt sein, um nicht ein theoretisch

erwartetes, sondern empirisch nachgewiesenes Verhalten in Deutschland abzubilden. Rigiditäten, die durch den Kapitalstock, den damit verbundenen Energieeinsatz sowie den Ausbildungs- und Wissensstand der Erwerbspersonen auch mittel- und längerfristig bestehen, müssen bei der makroökonomischen Analyse berücksichtigt werden. Zudem soll bei der ex-ante Abschätzung der Klimafolgekosten neben den detaillierten Effekten auf Wirtschaftszweige, Haushalte und Konsumstrukturen und auch auf soziale Komponenten eingegangen werden. Hierfür eignet sich das nationale makroökonomische Input-Output Modell INFORGE/PANTA RHEI, das zur Berücksichtigung von Effekten des Klimawandels (gradueller Klimawandel, Extremwetterereignisse) sektorale (bottom-up) und gesamtwirtschaftliche funktionale Zusammenhänge kombiniert. Auf der Ebene von Sektoren werden detailliert die Effekte (Schäden und gegebenenfalls positive Wirkungen) des Klimawandels abgebildet. Dies führt zu sektorspezifischen Indikatoren und Schadenskategorien. Zudem lassen sich für unterschiedliche Szenarien gesamtwirtschaftlichen Effekte für die betroffenen Komponenten der Entstehungs- und Verwendungsseite, die Preise, sowie Auswirkungen am Arbeitsmarkt und der Verteilungsseite ableiten.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ackerman, F., DeCanio, S. J., Howarth, R. B. & Sheeran, K. (2009): Limitations of integrated assessment models of climate change. In: *Climatic Change* 95, S. 297–315. DOI: 10.1007/s10584-009-9570-x.
- Anthoff, D. & Tol, R. S. J. (2014): THE CLIMATE FRAMEWORK FOR UNCERTAINTY, NEGOTIATION AND DISTRIBUTION (FUND), TECHNICAL DESCRIPTION, VERSION 3.9. Online verfügbar unter <http://www.fund-model.org/files/documentation/Fund-3-9-Scientific-Documentation.pdf>.
- Avelino, A. F. T. & Dall'erba, S. (2019): Comparing the Economic Impact of Natural Disasters Generated by Different Input-Output Models – an Application to the 2007 Chehalis River Flood (WA). In: *Risk Analysis* 39 (1), S. 85–104. DOI: 10.1111/risa.13006.
- Balint, T., Lamperti, F., Mandel, A., Napoletano, M., Roventini, A. & Sapio, A. (2017): Complexity and the Economics of Climate Change – a Survey and a Look Forward. In: *Ecological Economics* 138, S. 252–265. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.03.032.
- Bauer, N., Mouratiadou, I., Luderer, G., Baumstark, L., Brecha, R. J., Edenhofer, O. & Kriegler, E. (2016): Global Fossil Energy Markets and Climate Change Mitigation – An Analysis with REMIND. In: *Climatic Change* 136 (1), S. 69–82. DOI: 10.1007/s10584-013-0901-6.
- Becker, L., Bernardt, F., Bieritz, L., Mönnig, a., Parton, F., Ulrich, P. & Wolter, M. I. (2022): IN-FORGE in a Pocket. GWS-Kurzmitteilung 2022/02. Online verfügbar unter <https://www.gws-os.com/de/publikationen/gws-kurzmitteilungen/detail/inforge-in-a-pocket>.
- Berg, M., Hartley, B. & Richters, O. (2015): A stock-flow consistent input–output model with applications to energy price shocks, interest rates, and heat emissions. In: *New Journal of Physics* 17 (1), S. 1–21. DOI: 10.1088/1367-2630/17/1/015011.
- Bosetti, V., Carraro, C., Galeotti, M., Massetti, E. & Tavoni, M. (2006): WITCH – A World Induced Technical Change Hybrid Model. Ca' Foscari University of Venice, Venedig. Economic Research Paper 46/06.
- Boulanger, P.-M. & Bréchet, T. (2005): Models for policy-making in sustainable development – The state of the art and perspectives for research. In: *Ecological Economics* 55 (3), S. 337–350. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2005.07.033.
- Bubeck, P., Kienzler, S., Dillenardt, L., Mohor, G. S., Thieken, A. H., Sauer, A., Neubert, M., Blazejczak, J. & Edler, D. (2020): Bewertung klimawandelgebundener Risiken: Schadenspotenziale und ökonomische Wirkung von Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen – Abschlussbericht zum Vorhaben „Behördenkooperation Klimawandel und -anpassung“, Teil 1. Hg. v. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Climate Change 29/2020.
- Cambridge Econometrics (2019): E3ME Technical Manual – Version 6.1. Cambridge Econometrics, Cambridge, UK. Online verfügbar unter <https://www.e3me.com/wp-content/uploads/2019/09/E3ME-Technical-Manual-v6.1-onlineSML.pdf>.
- Capros, P., van Regemorter, D., Paroussos, L. & Karkatsoulis, P. (2017): GEM-E3 – Model Manual, Athen. Online verfügbar unter <https://e3modelling.com/wp->

content/uploads/2018/10/GEM-E3_manual_2017.pdf.

- Caverzasi, E. & Godin, A. (2015): Post-Keynesian stock-flow-consistent modelling – A survey. In: *Cambridge Journal of Economics* 39 (1), S. 157–187. DOI: 10.1093/cje/beu021.
- Château, J., Dellink, R. & Lanzi, E. (2014): An Overview of the OECD ENV-Linkages Model – Version 3. OECD, Paris. OECD Environment Working Papers 65. Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/content/paper/5jz2qck2b2vd-en>.
- Ciarli, T. & Savona, M. (2019): Modelling the Evolution of Economic Structure and Climate Change – A Review. In: *Ecological Economics* 158, S. 51–64. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.12.008.
- Ciscar, J.-C. (2009): Climate change impacts in Europe – Final report of the PESETA research project. Publications Office of the European Union, Luxembourg (Luxembourg). JRC55391.
- Ciscar, J.-C., Szabó, L., van Regemorter, D. & Soria, A. (2012): The integration of PESETA sectoral economic impacts into the GEM-E3 Europe model: methodology and results. In: *Climatic Change* 112 (1), S. 127–142. DOI: 10.1007/s10584-011-0343-y.
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., Hourcade, J.-C., Krey, V., Kriegler, E., Löschel, A., McCollum, D., Paltsev, S., Rose, S., Shukla, P. R., Tavoni, M., van der Zwaan, B. & van Vuuren, D. P. (2014): Assessing Transformation Pathways. In: Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs-Madruga, Youba Sokona, Jan C. Minx, Ellie Farahani, Susanne Kadner et al. (Hg.): *Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, S. 413–510. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- Copeland, M. A. (1949): Social Accounting for Moneyflows. In: *The Accounting Review* 24 (3), S. 254–264. Online verfügbar unter <https://www.jstor.org/stable/240684>.
- Costa, M. M., Schulze, S., Hirschfeld, J., Rechid, D., Bieritz, L., Lutz, C., Nieters, A., Stöver, B., Jahn, M., Rische, M.-C., Yadegar, E., Schröder, A., Hirte, G., Langer, S., Tscharktschiew, S., Eisenack, K. & Steinhäuser, J.-M. (2016): Synthesis of existing regional and sectoral economic modelling and its possible integration with regional earth system models in the context of climate modelling. Techreport. Climate Service Center Germany (GERICS), Hamburg. 27. Online verfügbar unter <https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/report27.pdf>.
- Covington, H. & Thamotheam, R. (2015): The Case for Forceful Stewardship (Part 1): The Financial Risk from Global Warming. In: *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2551478.
- Czupryna, M., Franzke, C., Hokamp, S. & Scheffran, J. (2020): An Agent-Based Approach to Integrated Assessment Modelling of Climate Change. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 23 (3), S. 1–7. Online verfügbar unter <https://ideas.repec.org/a/jas/jasssj/2018-76-3.html>.
- Deissenberg, C., van der Hoog, S. & Dawid, H. (2008): EURACE – A massively parallel agent-based model of the European economy. In: *Applied Mathematics and Computation* 204

(2), S. 541–552. DOI: 10.1016/j.amc.2008.05.116.

- Deloitte Economics Institute (2021): Turning point – Technical appendix. Hg. v. Deloitte Asia Pacific Services Limited.
- Delzeit, R., Heimann, T., Schünemann, F. & Söder, M. (2021): DART-BIO – A technical description. Hg. v. Kiel Institute for the World Economy (IfW), Kiel. Working Paper 2195. Online verfügbar unter https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/-ifw/Kiel_Working_Paper/2021/KWP_2195_Heimann_etal_DART-BIO/KWP2195_DART-BIO.pdf.
- Dennig, F., Budolfson, M. B., Fleurbaey, M., Siebert, A. & Socolow, R. H. (2015): Inequality, climate impacts on the future poor, and carbon prices. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112 (52), S. 15827–15832. DOI: 10.1073/pnas.1513967112.
- Dosi, G. (Hg.) (2012): Economic organization, industrial dynamics and development – Selected essays, Cheltenham. Edward Elgar Publishing.
- Dosi, G. & Virgillito, M. E. (2021): In order to stand up you must keep cycling: Change and coordination in complex evolving economies. In: *Structural Change and Economic Dynamics* 56, S. 353–364. DOI: 10.1016/j.strueco.2017.06.003.
- Eamen, L., Brouwer, R. & Razavi, S. (2020): The economic impacts of water supply restrictions due to climate and policy change – A transboundary river basin supply-side input-output analysis. In: *Ecological Economics* 172, S. 106532. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.106532.
- Edenhofer, O., Lessmann, K. & Bauer, N. (2006): Mitigation Strategies and Costs of Climate Protection: The Effects of ETC in the Hybrid Model MIND. In: *The Energy Journal* (Special Issue# 1), S. 207–222. DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-VolSI2006-NoSI1-10.
- Emmerling, J., Drouet, L., Reis, L. A., Bevione, M., Berger, L., Bosetti, V., Carrara, S., Cian, E. de, D’Aertrycke, G. D. M., Longden, T., Malpede, M., Marangoni, G., Sferra, F., Witajewski-Baltvilks, J. & Havlík, P. (2016): The WITCH 2016 Model – Documentation and Implementation of the Shared Socioeconomic Pathways. Hg. v. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM). Online verfügbar unter <https://www.jstor.org/stable/resrep15162>.
- Faehn, T., Bachner, G., Beach, R., Chateau, J., Fujimori, S., Ghosh, M., Hamdi-Cherif, M., Lanzi, E., Paltsev, S., Vandyck, T., Cunha, B., Garaffa, R. & Steininger, K. (2020): Capturing key energy and emission trends in CGE models – Assessment of Status and Remaining Challenges. In: *Journal of Global Economic Analysis* 5 (1), S. 196–272. DOI: 10.21642/JGEA.050106AF.
- Fagiolo, G. & Roventini, A. (2017): Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models Redux: New Developments and Challenges Ahead. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 20 (1). DOI: 10.18564/jasss.3280.
- Farmer, J. D. & Foley, D. (2009): The economy needs agent-based modelling. In: *Nature* (460), 685–656. Online verfügbar unter <http://econ2.econ.iastate.edu/tesfatsi/Economy-NeedsABM.NatureAug2009.FarmerFoley.pdf>.
- Farmer, J. D., Hepburn, C., Mealy, P. & Teytelboym, A. (2015): A Third Wave in the Economics

of Climate Change. In: *Environmental and Resource Economics* 62 (2), S. 329–357. DOI: 10.1007/s10640-015-9965-2.

- Fazekas, D., Goldman, M., Kórmúves, Z. & Pavelka, A. (2021): Climate impact assessment – Impacts of climate change scenarios on the Hungarian economy. Central Bank of Hungary - Magyar Nemzeti Bank, Budapest. Online verfügbar unter https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2021/05/MNB_CE_Final_Report_May-2021-2.pdf.
- Feyen, L., Ciscar, J., Gosling, S., Ibarreta, D. & Soria, A. (Hg.) (2020): Climate change impacts and adaptation in Europe: JRC PESETA IV final report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Finnveden, G. & Moberg, Å. (2005): Environmental Systems Analysis Tools – An Overview. In: *Journal of Cleaner Production* 13 (12), S. 1165–1173. DOI: 10.1016/j.jclepro.2004.06.004.
- Garcia-Hernandez, J. A. & Brouwer, R. (2020): A multiregional input-output optimization model to assess impacts of water supply disruptions under climate change on the Great Lakes economy. In: *Economic Systems Research*, S. 1–27. DOI: 10.1080/09535314.2020.1805414.
- Gerst, M. D., Wang, P., Roventini, A., Fagiolo, G., Dosi, G., Howarth, R. B. & Borsuk, M. E. (2013): Agent-based modeling of climate policy – An introduction to the ENGAGE multi-level model framework. In: *Environmental Modelling & Software* 44, S. 62–75. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.09.002.
- Godley, W. & Lavoie, M. (2007): *Monetary Economics – An Integrated Approach to Credit, Money, Income, Production and Wealth*. Palgrave Macmillan UK, London.
- Grubb, M., Wieners, C. & Yang, P. (2021): Modeling myths – On DICE and dynamic realism in integrated assessment models of climate change mitigation. In: *WIREs Climate Change* 12 (3), e698. DOI: 10.1002/wcc.698.
- Haas, A. & Jaeger, C. (2005): Agents, Bayes, and Climatic Risks – A Modular Modelling Approach. In: *Advances in Geosciences* 4, S. 3–7. DOI: 10.5194/adgeo-4-3-2005.
- Haimes, Y. Y., Horowitz, B. M., Lambert, J. H., Santos, J. R., Lian, C. & Crowther, K. G. (2005): Inoperability Input-Output Model for Interdependent Infrastructure Sectors. I: Theory and Methodology. In: *Journal of Infrastructure Systems* 11 (2), S. 67–79. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(67).
- Haimes, Y. Y. & Jiang, P. (2001): Leontief-Based Model of Risk in Complex Interconnected Infrastructures. In: *Journal of Infrastructure Systems* 7 (1), S. 1–12. DOI: 10.1061/(ASCE)1076-0342(2001)7:1(1).
- Hallegatte, S. (2008): An Adaptive Regional Input-Output Model and its Application to the Assessment of the Economic Cost of Katrina. In: *Risk Analysis* 28 (3), S. 779–799. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2008.01046.x.
- Hardt, L. & O'Neill, D. W. (2017): Ecological Macroeconomic Models – Assessing Current Developments. In: *Ecological Economics* 134, S. 198–211. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2016.12.027.
- Harrison, P. A., Dunford, R. W., Holman, I. P. & Rounsevell, M. D. A. (2016): Climate change

impact modelling needs to include cross-sectoral interactions. In: *Nature Climate Change* 6 (9), S. 885–890. DOI: 10.1038/nclimate3039.

Harrison, P. A., Holman, I. P. & Berry, P. (2015): Assessing cross-sectoral climate change impacts, vulnerability and adaptation: an introduction to the CLIMSAVE project. In: *Climatic Change* 128 (3-4), S. 153–167. DOI: 10.1007/s10584-015-1324-3.

Harrison, P. A., Holman, I. P., Cojocaru, G., Kok, K., Kontogianni, A., Metzger, M. J. & Gramberger, M. (2013): Combining qualitative and quantitative understanding for exploring cross-sectoral climate change impacts, adaptation and vulnerability in Europe. In: *Regional Environmental Change* 13 (4), S. 761–780. DOI: 10.1007/s10113-012-0361-y.

Hasselmann, K. & Kovalevsky, D. V. (2013): Simulating animal spirits in actor-based environmental models. In: *Environmental Modelling & Software* 44, S. 10–24. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.04.007.

Hinterlang, N., Martin, A., Röhe, O., Stahler, N. & Strobel, J. (2021): Using Energy and Emissions Taxation to Finance Labor Tax Reductions in a Multi-Sector Economy: An Assessment with Emuse. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.4025680.

Hirschfeld, J., Pissarskoi, E., Schulze, S. & Stöver, J. (2015): Kosten des Klimawandels und der Anpassung an den Klimawandel aus vier Perspektiven – Impulse der deutschen Klimaökonomie zu Fragen der Kosten und Anpassung. Hintergrundpapier zum 1. Forum Klimaökonomie. Forum Klimaökonomie. Dialog zur Klimaökonomie. Online verfügbar unter https://www.fona.de/medien/pdf/Hintergrundpapier_Forum_Kosten.pdf?m=1548322391&.

Holcombe, M., Coakley, S., Kiran, M., Chin, S., Greenough, C., Worth, D., Cincotti, S., Raberto, M., Teglio, A., Deissenberg, C., van der Hoog, S., Dawid, H., Gemkow, S., Harting, P. & Neugart, M. (2013): Large-Scale Modeling of Economic Systems. In: *Complex Systems* 22 (2), S. 175–192. DOI: 10.25088/ComplexSystems.22.2.175.

Industrial Economics Incorporated (IEc) & Interindustry Economic Research Fund (IERF) (2015): Assessment of the Economy-wide Employment Impacts of EPA's Proposed Clean Power Plan. Resreport. Industrial Economics Incorporated (IEc), Cambridge MA. Online verfügbar unter http://www.inforum.umd.edu/papers/otherstudies/2015/iec_inforum_report_041415.pdf.

Jackson, T., Victor, P. & Asjad Naqvi, A. (2015): Towards a stock-flow consistent ecological macroeconomics. In: *PASSAGE Working Paper* (15/02).

Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, van Regemorter, D., Capros, P. & Paroussos, L. (2013): GEM-E3 Model Documentation. Resreport. Unter Mitarbeit von M. Perry, J. Ciscar, J. Pycroft, J. Abrell und B. Saveyn. European Commission. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2788/47872>.

Kemfert, C. (2002): An Integrated Assessment Model of Economy-Energy-Climate – The Model Wiagem. In: *Integrated Assessment* 3 (4), S. 281–298. DOI: 10.1076/iaij.3.4.281.13590.

Kemfert, C. (2007): Klimawandel kostet die deutsche Volkswirtschaft Milliarden. Hg. v. DIW, Berlin. Wochenbericht 11/2007.

Kemmler, A., Kirchner, A., auf der Maur, A., Ess, F., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T.,

- Straßburg, S., Wunsch, M. & Ziegenhagen, I. (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 – Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030. Hg. v. Prognos AG, Basel.
- Kirman, A. (2016): ANTS AND NONOPTIMAL SELF-ORGANIZATION: LESSONS FOR MACROECONOMICS. In: *Macroeconomic Dynamics* 20 (2), S. 601–621. DOI: 10.1017/S1365100514000339.
- Klein, D., Luderer, G., Kriegler, E., Strefler, J., Bauer, N., Leimbach, M., Popp, A., Dietrich, J. P., Humpenöder, F., Lotze-Campen, H. & Edenhofer, O. (2014): The value of bioenergy in low stabilization scenarios: an assessment using REMIND-MAGPIE. In: *Climatic Change* 123, S. 705–718. DOI: 10.1007/s10584-013-0940-z.
- Klepper, G. & Peterson, S. (2004): DART: A non-technical model description. Hg. v. Kiel Institute for World Economics.
- Klepper, G., Peterson, S. & Springer, K. (2003): DART97: A Description of the Multi-regional, Multi-sectoral Trade Model for the Analysis of Climate Policies. Kiel working paper 1149. Online verfügbar unter https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/Gernot_Klepper/dart97-a-description-of-the-multi-regional-multi-sectoral-trade-model-for-the-analysis-of-climate-policies/kap1149.pdf.
- Kovalevsky, D. V. & Hasselmann, K. (2014): A Hierarchy of Out-of-Equilibrium Actor-Based System-Dynamic Nonlinear economic Models. In: *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity* 3 (3), S. 303–318. DOI: 10.5890/DNC.2014.09.007.
- Kunze, R. & Schreiber, S. (2021): Model Coupling Approach for the Analysis of the Future European Energy System. In: Dominik Möst, Steffi Schreiber, Andrea Herbst, Martin Jakob, Angelo Martino und Witold-Roger Poganietz (Hg.): *The Future European Energy System. Renewable Energy, Flexibility Options and Technological Progress*. Cham: Springer International Publishing, S. 27–51.
- Lamperti, F., Dosi, G., Napoletano, M., Roventini, A. & Sapio, A. (2018): Faraway, So Close – Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model. In: *Ecological Economics* 150, S. 315–339. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2018.03.023.
- Lamperti, F., Dosi, G., Napoletano, M., Roventini, A. & Sapio, A. (2020): Climate change and green transitions in an agent-based integrated assessment model. In: *Technological Forecasting and Social Change* 153, S. 119806. DOI: 10.1016/j.techfore.2019.119806.
- Lamperti, F., Mandel, A., Napoletano, M., Sapio, A., Roventini, A., Balint, T. & Khorenzhenko, I. (2019): Towards agent-based integrated assessment models: examples, challenges, and future developments. In: *Regional Environmental Change* 19, S. 747–762. DOI: 10.1007/s10113-018-1287-9.
- Lavoie, M. & Godley, W. (2001): Kaleckian Models of Growth in a Coherent Stock-Flow Monetary Framework – A Kaldorian View. In: *Journal of Post Keynesian Economics* 24 (2), S. 277–311. DOI: 10.1080/01603477.2001.11490327.
- Lavoie, M. & Zezza, G. (Hg.) (2012): *The Stock-Flow Consistent Approach*, London. Palgrave Macmillan.
- Lehr, U., Flaute, M., Ahmann, L., Nieters, A., Hirschfeld, J., Welling, M., Wolff, C., Gall, A.,

- Kersting, J., Mahlbacher, M. & Möllendorff, v. C. (2020): Vertiefte ökonomische Analyse einzelner Politikinstrumente und Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel. 43. Aufl. Hg. v. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. *Climate Change* 43/2020.
- Lehr, U. & Lutz, C. (2020): Macro-econometric and structural models. In: Uğur Soytas und Ramazan Sari (Hg.): *Routledge handbook of energy economics*. London, New York: Routledge (Routledge International Handbooks), S. 473–481.
- Lehr, U. & Nieters, A. (2015): Makroökonomische Bewertung von Extremwetterereignissen in Deutschland. In: *Ökologisches Wirtschaften* 30 (1), S. 18–20. DOI: 10.14512/OEW300118.
- Lehr, U., Nieters, A. & Drosdowski, T. (2016): Extreme Weather Events and the German Economy – The Potential for Climate Change Adaptation. In: Walter Leal Filho, Haruna Musa, Gina Cavan, Paul O'Hare und Julia Seixas (Hg.): *Climate Change Adaptation, Resilience and Hazards*. Cham: Springer International Publishing (Climate Change Management), S. 125–141.
- Leimbach, M., Bauer, N., Baumstark, L. & Edenhofer, O. (2010a): Mitigation Costs in a Globalized World: Climate Policy Analysis with REMIND-R. In: *Environmental Modeling & Assessment* 15 (3), S. 155–173. DOI: 10.1007/s10666-009-9204-8.
- Leimbach, M., Bauer, N., Baumstark, L., Luken, M. & Edenhofer, O. (2010b): Technological Change and International Trade – Insights from REMIND-R. In: *EJ* 31 (01). DOI: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol31-NoSI-5.
- Leontief, W. (1970): Environmental Repercussions and the Economic Structure – An Input-Output Approach. In: *The Review of Economics and Statistics* 52 (3), S. 262–271. DOI: 10.2307/1926294.
- Liu, L., Huang, G., Baetz, B., Cheng, G., Pittendrigh, S. M. & Pan, S. (2020): Input-output modeling analysis with a detailed disaggregation of energy sectors for climate change policy-making – A case study of Saskatchewan, Canada. In: *Renewable Energy* 151, S. 1307–1317. DOI: 10.1016/j.renene.2019.11.136.
- Mandel, A., Fürst, S., Lass, W., Meissner, F. & Jaeger, C. (2009): Lagom generiC: an agent-based model of growing economies. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam. Online verfügbar unter https://globalclimateforum.org/fileadmin/ecf-documents/publications/ecf-working-papers/mandel-fuerst-lass-meissner-jaeger__ecf-working-paper_2009-01.pdf.
- Mathias, J.-D., Debeljak, M., Deffuant, G., Diemer, A., Dierickx, F., Donges, J. F., Gladkykh, G., Heitzig, J., Holtz, G., Obergassel, W., Pellaud, F., Sánchez, Angel, Trajanov, A. & Videira, N. (2020): Grounding Social Foundations for Integrated Assessment Models of Climate Change. In: *Earth's future* 8 (7), e2020EF001573. DOI: 10.1029/2020ef001573.
- Mendelsohn, R. (2020): Integrated Assessment and Climate Change. In: *Climate Change Economics* 11 (04), S. 1–13. DOI: 10.1142/s2010007820400047.
- Mokrech, M., Kebede, A. S., Nicholls, R. J., Wimmer, F. & Feyen, L. (2015): An integrated approach for assessing flood impacts due to future climate and socio-economic conditions and the scope of adaptation in Europe. In: *Climatic Change* 128 (3-4), S. 245–260. DOI:

10.1007/s10584-014-1298-6.

- Monasterolo, I. & Raberto, M. (2016): A Hybrid System Dynamics – Agent Based Model to Assess the Role of Green Fiscal and Monetary Policies. In: *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2748266.
- Moss, S. (2002a): Agent Based Modelling for Integrated Assessment. In: *Integrated Assessment* 3 (1), S. 63–77. DOI: 10.1076/iaij.3.1.63.7407.
- Moss, S. (2002b): Policy analysis from first principles. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99 (3), S. 7267–7274. DOI: 10.1073/pnas.092080699.
- Nordhaus, W. (2013): Integrated Economic and Climate Modeling. In: Peter B. Dixon und Dale W. Jorgenson (Hg.): *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Volume 1A-1B, Bd. 1. Oxford, UK, Waltham, USA: Elsevier (Handbook of Computable General Equilibrium Modeling), S. 1069–1131.
- Nordhaus, W. (2014): Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches. In: *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 1 (1/2), S. 273–312. DOI: 10.1086/676035.
- Nordhaus, W. D. (2017): Evolution of Assessments of the Economics of Global Warming: Changes in the DICE model, 1992 – 2017. National Bureau of Economic Research, Cambridge. Working Paper 23319.
- Nordhaus, W. D. & Sztorc, P. (2013): DICE 2013R – Introduction and User’s Manual. 2. Aufl. Online verfügbar unter http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf.
- Nordhaus, W. D. & Yang, Z. (1996): A Regional Dynamic General-Equilibrium Model of Alternative Climate-Change Strategies. In: *American Economic Review* 86 (4), S. 741–765.
- OECD: ENV-Linkages model. In: OECD Publishing (Hg.): *The Economic Benefits of Air Quality Improvements in Arctic Council Countries*. Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/content/component/cad997c9-en>.
- Okuyama, Y. (2004): Modeling spatial economic impacts of an earthquake: input-output approaches. In: *Disaster Prevention and Management* 13 (4), S. 297–306. DOI: 10.1108/09653560410556519.
- Okuyama, Y. & Santos, J. R. (2014): DISASTER IMPACT AND INPUTOUTPUT ANALYSIS. In: *Economic Systems Research* 26 (1), S. 1–12. DOI: 10.1080/09535314.2013.871505.
- Peichl, A. (2005): Die Evaluation von Steuerreformen durch Simulationsmodelle, Universität Köln. Finanzwissenschaftliche Diskussionsbeiträge 5.
- Pelling, M., Özerdem, A. & Barakat, S. (2002): The macro-economic impact of disasters. In: *Progress in Development Studies* 2 (4), S. 283–305. DOI: 10.1191/1464993402ps042ra.
- Percoco, M. (2006): A note on the inoperability input-output model. In: *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis* 26 (3), S. 589–594. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2006.00765.x.
- Peter, M., Guyer, M., Füssler, J., Bednar-Friedl, B., Knittel, N., Gabriel, B., Schwarze, R. &

- Unger, M. von (2020): Folgen des globalen Klimawandels für Deutschland – Abschlussbericht: Analysen und Politikempfehlungen. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2020-05-06_cc_15-2020_impactchain.pdf.
- Pfaff, M. & Walz, R. (2020): Changing energy efficiency technology adoption in households – D 6.2 Scientific working paper on macroeconomic effects of energy efficiency policy. European Union. Online verfügbar unter https://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-6306813.pdf.
- Philip, P., Ibrahim, C. & Hodges, C. (2021): Germany's turning point – Accelerating new growth on the path to net zero. Hg. v. Deloitte Global.
- Pindyck, R. S. (2013): Climate Change Policy – What Do the Models Tell Us? In: *Journal of Economic Literature* 51 (3), S. 860–872. DOI: 10.1257/jel.51.3.860.
- Ponta, L., Raberto, M., Teglio, A. & Cincotti, S. (2018): An Agent-based Stock-flow Consistent Model of the Sustainable Transition in the Energy Sector. In: *Ecological Economics* 145, S. 274–300. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2017.08.022.
- Prinn, R. G. (2013): Development and application of earth system models. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 1, S. 3673–3680. DOI: 10.1073/pnas.1107470109.
- Reilly, J., Paltsev, S., Strzepek, K., Selin, N. E., Cai, Y., Nam, K.-M., Monier, E., Dutkiewicz, S., Scott, J., Webster, M. & Sokolov, A. (2012): Valuing climate impacts in integrated assessment models – The MIT IGSM. Hg. v. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. MIT, Cambridge. 219.
- Revesz, R. L., Howard, P. H., Arrow, K., Goulder, L. H., Kopp, R. E., Livermore, M. A., Oppenheimer, M. & Sterner, T. (2014): Global warming – Improve economic models of climate change. In: *Nature* 508, S. 173–175. DOI: 10.1038/508173a.
- Rose, A. (2004): Economic Principles, Issues, and Research Priorities in Hazard Loss Estimation. In: Yasuhide Okuyama und Stephanie E. Chang (Hg.): *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 13–36.
- Rose, A., Benavides, J., Chang, S. E., Szczesniak, P. & Lim, D. (1997): The Regional Economic Impact of an Earthquake: Direct and Indirect Effects of Electricity Lifeline Disruptions. In: *Journal of Regional Science* 37 (3), S. 437–458. DOI: 10.1111/0022-4146.00063.
- Rose, A. & Liao, S.-Y. (2005): Modeling regional economic resilience to disasters – A computable general equilibrium analysis of water service disruptions. In: *Journal of Regional Science* 45 (1), S. 75–112.
- Santos, J. (2020): Using input-output analysis to model the impact of pandemic mitigation and suppression measures on the workforce. In: *Sustainable production and consumption* 23, S. 249–255. DOI: 10.1016/j.spc.2020.06.001.
- Santos, J. R. & Haines, Y. Y. (2004): Modeling the demand reduction input-output (I-O) inoperability due to terrorism of interconnected infrastructures. In: *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis* 24 (6), S. 1437–1451. DOI: 10.1111/j.0272-4332.2004.00540.x.

- Schütze, F., Fürst, S., Mielke, J., Steudle, G., Wolf, S. & Jaeger, C. (2017): The Role of Sustainable Investment in Climate Policy. In: *Sustainability* 9 (12), S. 2221. DOI: 10.3390/su9122221.
- Sokolov, A., Kicklighter, D., Schlosser, A., Wang, C., Monier, E., Brown-Steiner, B., Prinn, R., Forest, C., Gao, X., Libardoni, A. & Eastham, S. (2018): Description and Evaluation of the MIT Earth System Model (MESM). In: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 10 (8), S. 1759–1789. DOI: 10.1029/2018MS001277.
- Sokolov, A. P., Schlosser, A., Dutkiewicz, S., Paltsev, S., Kicklighter, D. W., Jacoby, H. D., Prinn, R. G., Forest, C. E., Reilly, J. M., Wang, C., Felzer, B. S., Sarofim, M. S., Scott, J., Stone, P. H., Melillo, J. & Cohen, J. B. (2005): The MIT Integrated Global System Model (IGSM) Version 2 – Model Description and Baseline Evaluation. Joint Program Report Series 124. Online verfügbar unter <https://globalchange.mit.edu/publication/14579>.
- Steininger, K. W., Bednar-Friedl, B., Formayer, H. & König, M. (2016): Consistent economic cross-sectoral climate change impact scenario analysis: – Method and application to Austria. In: *Climate Services* 1, S. 39–52. DOI: 10.1016/j.cliser.2016.02.003.
- Steininger, K. W., König, M., Bednar-Friedl, B., Kranzl, L., Loibl, W. & Prettenthaler, F. (Hg.) (2015): Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria, Cham. Springer International Publishing.
- Stern, N. (2013): The Structure of Economic Modeling of the Potential Impacts of Climate Change – Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models. In: *Journal of Economic Literature* 51 (3), S. 838–859. DOI: 10.1257/jel.51.3.838.
- Stern, N. (2016): Economics – Current climate models are grossly misleading. In: *Nature* 530, S. 407–409. DOI: 10.1038/530407a.
- Su, Y., Liu, X., Ji, J. & Ma, X. (2021): Role of economic structural change in the peaking of China's CO₂ emissions – An input–output optimization model. In: *Science of The Total Environment* 761, S. 143306. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143306.
- Tsuchiya, S., Tatano, H. & Okada, N. (2007): Economic Loss Assessment due to Railroad and Highway Disruptions 19 (2), S. 147–162. DOI: 10.1080/09535310701328567.
- Ulrike Lehr & Christian Lutz (2019): Macro-econometric and structural models. In: Routledge Handbook of Energy Economics: Routledge, S. 473–481.
- Victor, P. A. (1972): Input-Output Analysis of Economic and Environmental Interactions. In: Peter A. Victor (Hg.): Economics of Pollution. London: Macmillan Education UK, S. 55–72.
- Weber, M. (2004): A Multi-Actor Dynamic Integrated Assessment Model (MADIAM). Max-Planck-Institut für Meteorologie. Online verfügbar unter https://mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/erdsystem_03.pdf.
- Weber, M., Barth, V. & Hasselmann, K. (2005): A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth. In: *Ecological Economics* 54 (2-3), S. 306–327. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2004.12.035.
- Weitzel, M. (2010): Including renewable electricity generation and CCS into the DART model. Kiel Institute for the World Economy. Online verfügbar unter https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/Matthias_Weitzel/including-renewable-electricity-

generation-and-ccs-into-the-dart-model/DART-renewables-ccs.pdf.

- Weitzel, M., Saveyn, B. & Vandyck, T. (2019): Including bottom-up emission abatement technologies in a large-scale global economic model for policy assessments. In: *Energy Economics* 83, S. 254–263. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.07.004.
- Weitzman, M. L. (2013): Tail-Hedge Discounting and the Social Cost of Carbon. In: *Journal of Economic Literature* 51 (3), S. 873–882. DOI: 10.1257/jel.51.3.873.
- Weyant, J. (2017): Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. In: *Review of Environmental Economics and Policy* 11 (1), S. 115–137. DOI: 10.1093/reep/rew018.
- Wolf, S., Fürst, S., Mandel, A., Lass, W., Lincke, D., Pablo-Martí, F. & Jaeger, C. (2013): A multi-agent model of several economic regions. In: *Environmental Modelling & Software* 44 (C), S. 25–43. DOI: 10.1016/j.envsoft.2012.12.012.
- Wu, S. & Han, H. (2020): Sectoral changing patterns of China's green GDP considering climate change: An investigation based on the economic input-output life cycle assessment model. In: *Journal of Cleaner Production* 251, S. 119764. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119764.
- Zanhoun, D. A. K. & Nana, A. B. I. (2019): Modeling Climate Change Impact on Health and Population Migration – A Systematic Review. In: *Economics Literature* 1 (1), S. 51–65. DOI: 10.22440/elit.1.1.4.