

Verbundschlussbericht – Teil II

Zuwendungsempfänger:

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V. (PIK)

Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC)

Justus-Liebig-Universität Gießen (ursprünglich für die Leibniz Universität Hannover bewilligt)

Institut für Weltwirtschaft Kiel – IfW (ursprünglich für ifo Institut München bewilligt)

Förderkennzeichen: 01LA1828A, 01LA1828B, 01LA1828C, 01LA1828D

Vorhabenbezeichnung:



Klimapolitik und Vermeidungsstrategien in global vernetzten und sich entwickelnden Volkswirtschaften: Die Rolle von Strukturwandel und Verteilungseffekten

Mitigation Policies in a Globalized and developing World: The Role of Structural Change and Distributional Effects

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DLR Projektträger

Laufzeit des Vorhabens: Januar 2019 – Juni 2022

Inhaltsverzeichnis

VERBUNDSCHLUSSBERICHT	0
TEIL II: EINGEHENDE DARSTELLUNG.....	4
II.1 DARSTELLUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE UND VORAUSSICHTLICHER NUTZEN	4
II.1.1 ARBEITSPAKET 1.1: STRUKTURWANDEL UND ARMUT (MCC)	4
II.1.2 ARBEITSPAKET 1.2: INDUSTRIALISIERUNG UND EMISSIONEN (MCC).....	5
II.1.3 ARBEITSPAKET 1.3: HISTORISCHE TREIBER DES STRUKTURWANDELS (JLU)	5
II.1.4 AP 1.4: SENSITIVITÄT ZUKÜNFTIGER EMISSIONEN GEGENÜBER DEM STRUKTURWANDEL (PIK, MCC)	7
II.1.5 AP 2.1: HANDEL ALS TREIBER VON STRUKTURWANDEL UNTER DEM EINFLUSS VON KLIMAÄNDERUNG (IFW) ...	10
II.1.6 ARBEITSPAKET 2.2: LÄNDERSPEZIFISCHE EFFEKTE VON KLIMABEDINGTEM STRUKTURWANDEL (IFW)	11
II.1.7 ARBEITSPAKET 3.1: EFFEKTIVITÄT VON KLIMAPOLITIK IN STRUKTURWANDELSZENARIOEN (PIK).....	12
II.1.8 ARBEITSPAKET 3.2: GLOBALE TRANSFORMATIONSPFADE (PIK).....	13
II.1.9 ARBEITSPAKET 4.1: VERTEILUNGSEFFEKTE ZWISCHEN LÄNDERN (PIK).....	14
II.1.10 ARBEITSPAKET 4.2: VERTEILUNGSEFFEKTE AUF NATIONALER UND SEKTORALER EBENE (JLU)	15
II.1.11 ARBEITSPAKET 4.3: VERTEILUNGSEFFEKTE AUF HAUSHALTSEBENE (MCC).....	18
II.1.12 ARBEITSPAKET 4.4: GEKOPPELTE MODELLANALYSE VON VERTEILUNGSEFFEKTEN (PIK, ALL)	19
II.1.13 ARBEITSPAKET 4.5: MAßNAHMEN ZUR VERMEIDUNG NEGATIVER VERTEILUNGSEFFEKTE (IFW, ALL)	20
II.1.14 REFERENZEN	21
II.2 WICHTIGSTE POSITIONEN DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES	23
II.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN PROJEKTARBEITEN	23
II.3.1 TEILPROJEKT A: PIK.....	23
II.3.2 TEILPROJEKT B: MCC	24
II.3.3 TEILPROJEKT C: JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT GIEßEN.....	24
II.3.4 TEILPROJEKT D: KIEL INSTITUT FÜR WELTWIRTSCHAFT	25
II.4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE DES ENTSTANDENEN WISSENS	26
II.4.1 TEILPROJEKT A: PIK.....	26
II.4.2 TEILPROJEKT B: MCC	27
II.4.3 TEILPROJEKT C: JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT GIEßEN	28
II.4.4 TEILPROJEKT D: KIEL INSTITUT FÜR WELTWIRTSCHAFT	29

II.5 FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET BEI ANDEREN STELLEN	31
II.6 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN	31
II.6.1 ERFOLGTE BZW. EINGEREICHTE VERÖFFENTLICHUNGEN	31
II.6.2 GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN	33

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Produktionsverlust bei einer 3°C Erwärmung.....	9
Abbildung 2: Dekomposition der Reduktion der Emissionsintensität.....	13
Abbildung 3: Wohlfahrtseffekte von EU-Klimapolitik auf die deutsche Wohlfahrt (links) und auf deutsche Einkommensgruppen (rechts). Domestic: nur EU-Klimapolitik, Border: zusätzlich CO ₂ -Grenzausgleich.....	16

Teil II: Eingehende Darstellung

II.1 Darstellung der erzielten Ergebnisse und voraussichtlicher Nutzen

II.1.1 Arbeitspaket 1.1: Strukturwandel und Armut (MCC)

Unter Leitung des MCCs wurde am Anfang des Projekts zunächst ein Kommentar zu den übergeordneten Fragen Klima, Kohle und Strukturwandel in der Fachzeitschrift „Nature Energy“ veröffentlicht. Hierin argumentieren die Autoren, dass unterschiedliche Energieträger ökonomische Entwicklung und vor allem Strukturwandel unterschiedlich beeinflussen können. Der Artikel fasst die Forschungsfragen und Herausforderungen in den AP 1.1. und AP 1.2 gut zusammen (Kalkuhl u.a., 2019).

In Arbeitspaket 1.1 war geplant die Auswirkungen des Strukturwandels auf Armut, Arbeitsmarkt und Ungleichheit zu untersuchen. Die Vorarbeiten zu AP 1.1 haben Anfang 2020 mit einer vom Projektteam betreuten Masterarbeit (Herr Podehl, Master Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin) begonnen. Das Masterarbeitsprojekt sollte sicherstellen, dass die notwendigen Daten für Indien verfügbar sind und entsprechend verarbeitet werden. Dabei sind einige Probleme in der Datenstruktur aufgefallen, v.a. in Bezug auf (i) die Datenkonsistenz über verschiedene Umfragerunden hinweg; (ii) Datenschutzbeschränkungen, die keine Identifizierung von Unternehmen auf Distriktebene ermöglichen; (iii) Datenbeschränkungen, die im Laufe der Jahre keine Identifizierung von Unternehmen ermöglichen. Dies hat zu Verzögerungen im erwarteten Zeitplan und zu einer geringfügigen Änderung der Forschungsfrage und -daten des Projekts geführt. Aufgrund der Dateninkonsistenz der indischen Firmendaten konnte dieses Projekt nicht wie ursprünglich geplant auf Basis der NSS Daten zu Ende gebracht werden. Die Masterarbeit von Herrn Podehl liegt vor, erläutert aber en Detail die entsprechenden Probleme der Daten und der entsprechenden Analyse. Eine Überführung in eine wissenschaftliche Publikation ist unmöglich.

In einer weiteren Analyse haben wir die Fragestellung auf Indonesien erweitert. Dabei evaluieren wir die Auswirkungen von Investitionen in Kohlekraftwerke auf industriellen Strukturwandel und entsprechende Wohlfahrtseffekte ex-post. Die Datenstruktur und Qualität der indonesischen Daten lassen hier eine detaillierte (d.h. auf kommunaler Ebene) Analyse der Effekte zu. Die Ergebnisse wurden bei verschiedenen Konferenzen, z.B. beim entwicklungsökonomischen Ausschuss des VfS, der „European Economic Association“ der LEADS Konferenz oder der Jahrestagung des „Environment for Development“ Netzwerks vorgestellt (Missbach u.a., in Vorbereitung).

In der Vergangenheit ging die industrielle Entwicklung mit der Verbrennung von Kohle einher. Es gibt jedoch nur wenige Belege für Spillover-Effekte von Kohlekraftwerken auf Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes, insbesondere in den heutigen Schwellenländern, auf die der größte Teil der künftigen Kohlekapazität entfällt. Wir quantifizierten die Spillover-Effekte der Inbetriebnahme von Kohlekraftwerken auf lokale, etablierte Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes in Indonesien während des Zeitraums der Kohleeröffnung zwischen 1984 und 2015. Wir analysierten räumlich und

zeitlich explizite Produktions- und Kraftwerksdaten in einem gestapelten Differenz-in-Differenzen-Rahmen. Unter Ausnutzung einer quasi-zufälligen Variation des Behandlungszeitpunkts konnten wir zeigen, dass kohlebefeuerte Kraftwerke lokale Unternehmen mit mehr als 100 Beschäftigten dazu veranlassten, Input, Output und Beschäftigung zu steigern. Weitere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Kohlekraftwerke die Leistung von Unternehmen beeinflussen, indem sie die Zuverlässigkeit der Stromversorgung erhöhen, die lokale Verkehrsinfrastruktur ausbauen und eine Umverteilung von Arbeitskräften bewirken. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass beim Abbau der weltweiten Kohlekapazitäten solche positiven externen Effekte von Kohlekraftwerken wahrscheinlich berücksichtigt werden müssen.

II.1.2 Arbeitspaket 1.2: Industrialisierung und Emissionen (MCC)

Arbeitspaket 1.2 hatte zum Ziel vor allem den Zusammenhang zwischen Karbonisierungsprozessen und Strukturwandel zu verstehen. Ein primäres Ziel der Arbeiten war zu verstehen, ob es messbare Unterschiede zwischen kohlenstoffintensiven (z.B. aufbauend auf Kohle) und weniger kohlenstoffintensiven Wachstumspfaden festgestellt werden können.

Wir untersuchten dabei vor allem die Beziehung zwischen verschiedenen Arten von Strominvestitionen und der regionalen Wirtschaftsdynamik. Wir konstruierten einen neuartigen Paneldatensatz, der Daten zum regionalen BIP und zum Zubau von Stromkapazitäten für verschiedene Technologien zwischen 1960 und 2015 kombiniert und 65 % der in diesem Zeitraum weltweit installierten Stromkapazitäten abdeckt. Wir verwendeten ein Ereignisstudiendesign, um die Auswirkungen des Zubaus von Stromkapazitäten auf das Pro-Kopf-BIP zu ermitteln. Dabei nutzten wir die Tatsache, dass die genaue Menge an Stromkapazitäten, die jedes Jahr ans Netz geht, durch zufällige Bauverzögerungen bestimmt wird. Wir fanden Hinweise darauf, dass das Pro-Kopf-BIP in den sechs Jahren um die Inbetriebnahme von 100 MW Kohlekraftwerkskapazität um 0,2 % steigt. Ähnliche Effekte fanden wir für Wasserkraftkapazitäten, aber nicht für andere Arten von Stromkapazitäten. Die positiven Auswirkungen sind regional begrenzt und stärker bei Projekten an neuen Standorten (auf der grünen Wiese). Die Größenordnung dieses Effekts ist zwar nicht mit den gesamten externen Kosten für den Bau neuer Kohlekraftwerke vergleichbar, dennoch tragen unsere Ergebnisse dazu bei, zu erklären, warum politische Entscheidungsträger Kohleinvestitionen zur Förderung des regionalen Wachstums bevorzugen.

Die Arbeiten wurden in der Zeitschrift „Resource and Energy Economics“ publiziert (Montrone u.a., 2022). Das Papier wurde als zweitbestes von einem Doktoranden verfasste Papier im Förderschwerpunkt Klimaökonomie ausgezeichnet.

II.1.3 Arbeitspaket 1.3: Historische Treiber des Strukturwandels (JLU)

Arbeitspaket 1.3 wurde im Rahmen von Teilprojekt C (01LA1828C) an der Justus-Liebig-Universität (JLU) Gießen bearbeitet. Das Teilprojekt wurde ursprünglich an der Leibniz-Universität Hannover beantragt. Das Arbeitspaket hat das Ziel, relevante Einflussfaktoren sektoraler Verschiebungen der Produktion bzw. des Konsums innerhalb von Ökonomien, die durch globalen Handel vernetzt sind, anhand von Panel-Daten ökonometrisch aufzuschlüsseln. Neu ist hierbei die Betrachtung der resultierenden CO₂-

Emissionen. Die Ergebnisse sind sowohl für die Planung (inter-) nationaler Politiken, als auch für die Modellanalysen des Projekts relevant.

Dem Arbeitspaket 1.3 liegen etablierte und moderne Handelstheorien zugrunde (Ricardianische Theorie, Heckscher-Ohlin-Modell, Neue Quantitative Handelsmodelle basierend auf Eaton & Kortum 2002 und Melitz 2003). Arbeitspaket 1.3 knüpft an bestehende ökonometrische Strukturwandelanalysen an, wobei sektorale Konvergenz bisher kaum erforscht wurde (Crespo & Fontoura 2007, Uy u.a., 2013, Herrendorf u.a., 2014, Swiecki 2017). Datengrundlage bildet die World Input-Output Database (WIOD, 2013 & 2016, Timmer u.a., 2015, 2016). Daher bezieht sich das neu zu entwickelnde Strukturwandelmodell auf ein früher entwickeltes ökonometrisches Modell zur Verwendung von WIOD-Daten (Hübler & Glas 2014) und führt einen neuartigen Konvergenzmechanismus ein.

Die makroökonomische Analyse des Arbeitspaketes 1.3 stellten wir im Spätsommer 2020 annähernd nach Zeitplan fertig und publizierten sie später in „Environmental and Resource Economics“ (Hübler u.a., 2022a). Im Rahmen des „Revise & Resubmit“ verbesserten wir die theoretische Untermauerung des ökonometrischen Modells und bezogen in zusätzlichen ökonometrischen Schätzungen länderübergreifende Korrelationen durch internationale Verflechtungen ein, die nicht explizit durch Handelsdaten abgebildet werden. Zuvor hatten wir diese Arbeit im Rahmen unserer Projekttreffen 2019 in Potsdam und 2020 in Berlin präsentiert und diskutiert.

Unsere Forschungsergebnisse zeigen, dass internationaler Handel zu internationaler Konvergenz (Angleichung) sektoraler Strukturen führt, insbesondere zwischen Schwellen- und Industrieländern. Dies bedeutet, dass sich Klima- und Energiepolitiken langfristig auf ähnliche Weise auf die Produktionsstrukturen der Handelspartner auswirken werden wie auf das Inland. Kapital verstärkt diesen Effekt. Verwendet man statt Produktionswerten CO₂-Emissionen zur Messung der Sektorenanteile, so ergibt sich überraschend für das 21. Jahrhundert internationale Divergenz (Auseinanderbewegung) sektoraler Strukturen bzgl. der CO₂-Intensität der Produktion. Dies kann auf sog. „Carbon Leakage“-Effekte hindeuten, d. h., emissionsintensive Produktion verlagert sich ins Ausland und untermauert Klimapolitikmaßnahmen im Inland.

Des Weiteren führten wir in Zusammenarbeit mit Frau Bühler (Wirtschaftsministerium, München) eine mikroökonomische Analyse der Verbreitung von Smartphones in ruralen Gebieten Südostasiens und deren Einflussfaktoren wie wetter- bzw. klimabedingte Schocks weiter (Bühler & Hübler 2022). Strukturwandel betrifft hierbei die sukzessive Transformation traditioneller kleinbäuerlicher Verhältnisse hin zu einer digitalisierten und vernetzten Gesellschaft. Dies erfordert den Zugang zu modernen Technologien (Smartphones). Eine Innovation unseres neu entwickelten ökonometrischen Modells ist die Berücksichtigung der Zugehörigkeit von ruralen Haushalten zu sozialen Gruppen bzw. Netzwerken. Als Datengrundlage dient das Thailand Vietnam Socio Economic Panel (TVEP, DFG-finanziert). Unsere Forschung baut auf bestehenden Analysen der Mobiltelefon- bzw. Smartphone-Nutzung mit früheren Versionen des gleichen Datensatzes auf (Hübler & Hartje 2016, Hübler 2016).

Die aktuellen Ergebnisse bestätigen, dass höheres Einkommen, bessere Bildung und bereits vorhandene Technologien die Verbreitung von Smartphones begünstigen. Innerhalb einer ethnischen Gruppe scheint

es tendenziell zur Verbreitung und Angleichung der Smartphone-Nutzung zu kommen, ebenso unter den Selbständigen oder außerlandwirtschaftlich Berufstätigen, nicht jedoch innerhalb des landwirtschaftlichen Tätigkeitsbereiches. Wetter- bzw. klimabedingte negative (Einkommens-) Schocks behindern die Verbreitung der Smartphone-Nutzung.

Schließlich betreuten wir eine ökonometrische Arbeit von Studierenden aus Uganda und erstellten basierend darauf ein Working Paper. Darin zeigen wir, dass der Klimawandel die Ernährungssicherheit von Kleinbauern in Uganda gefährdet (Ogenroth u.a., 2022). Tierhaltung und Zugang zu neuen Anbaumethoden verbessern die Ernährungssicherheit und wirken somit den Klimaeffekten entgegen. Die Studierenden präsentierten die Arbeit im Rahmen einer wissenschaftlichen Konferenz.

II.1.4 Arbeitspaket 1.4: Sensitivität zukünftiger Emissionen gegenüber dem Strukturwandel (PIK, MCC)

Am MCC wurden drei verschiedene Wege ein stilisiertes multisektorales Wachstumsmodell zu gestalten ausprobiert. Alle drei wurden zu Konferenzpapieren ausgebaut: 1. Brenner, „The Environment and Innovation Supply“ (präsentiert auf der IAERE Jahrestagung und zur Präsentation bei der SURED Konferenz 2020 angenommen) fokussiert auf die Rolle der Arbeitsproduktivität und Innovation, 2. Kalkuhl, M. (2019) „Climate policy and endogenous economic growth with poor substitution possibilities“, zur Präsentation bei der Jahrestagung Europäischer Umwelt- und Ressourcenökonom 2019 zugelassen, fokussiert auf ein klassisches Wachstumsmodell mit einer expliziten Repräsentation eines fossilen und erneuerbaren Energiesektors und 3. Landström, Schwerhoff und Steckel, „Capabilities and structural change as engine for economic growth“, eingereicht zur Jahrestagung der Europäischen Ökonomischen Gesellschaft (EEA) nehmen empirische Erkenntnisse aus dem neu entstehenden Bereich der „Complexity Economics“ auf und theorisieren diese in einem Wachstumsmodell. Alle drei Papiere werden zurzeit für die Einreichung bei entsprechenden Fachzeitschriften vorbereitet.

Die Ergebnisse des Arbeitspakets sind in die Dissertation von Andri Brenner eingeflossen, die am 30.11.2021 eingereicht und positiv begutachtet worden ist. Ein Kapitel der Arbeit wurde darüber hinaus als CEPA Discussion Paper veröffentlicht (Brenner 2021). In der Arbeit geht es vor allem um den Strukturwandel im Innovationssektor – also die Änderung der Richtung des technischen Fortschritts weg von braunen Innovationen hin zu grünen Innovationen. In der Arbeit wird ein neuartiges endogenes Wachstumsmodell entwickelt. Dies zeigt auf, dass ein korrektes Verständnis der klimaökonomischen Zusammenhänge essenziell ist, um Anreize in grüne Innovationen zu erhöhen. Durch vermiedene Klimaschäden steigt nämlich auch der Wert (bzw. Patentpreis) einer Innovation, weil die Produktivität der gesamten Volkswirtschaft höher ist.

Schwerpunkt des PIK im Arbeitspaket 1.4 war die Entwicklung eines multisektoralen Wachstumsmodells, dass die Analyse von Interaktionen zwischen Klimapolitik und Strukturwandel ermöglichen soll. Die Modellentwicklung beinhaltete dabei empirische Arbeiten, Datensammlung und -aufbereitung. Länderspezifische makroökonomische Daten (World Development Indicator und Groningen Growth and

Development Center) und Energieverbrauchsdaten der Internationalen Energieagentur (IEA) wurden so aggregiert, dass sie die aktuelle sektorale Zerlegung des Modells berücksichtigen, d.h. einen Agrar-, einen Industrie- und einen Sektorservice.

Mit Hilfe der empirischen Analyse von Strukturwandel erlangten wir folgende Erkenntnisse: Entwicklungsländer folgen entwickelten Ländern im Strukturwandelprozess. Vergleicht man die USA und Indien, zeigt sich, dass die Arbeitskräfteanteil im Agrarsektor in den USA von 2,7% in 1980 auf 1,4% in 2010 gesunken ist, während er im Sektorservice im gleichen Zeitraum von 70,8% auf 84% gestiegen ist. Der Arbeitskräfteanteil in Indien im Agrarsektor sinkt zwar auch, aber der Anteil ist mit 54,6% in 2010 (nach 72,4% in 1980) immer noch sehr hoch, der Anteil im Sektorservice dagegen vergleichsweise niedrig (26% nach zuvor 16,6%). Ein entgegengesetzter Trend ist zwischen beiden Ländern im Industriesektor zu verzeichnen. In den USA sinkt der Arbeitskräfteanteil in diesem Sektor (14,6% nach zuvor 26,5%) und in Indien steigt er (19,5% nach zuvor 11%). Die ökonomische Entwicklung ist darüber hinaus begleitet von unterschiedlichen Mustern der Energienutzung. Eine höhere Energieproduktivität ist u.a. Folge der Produktion von weniger energieintensiven Gütern (Serviceproduktion anstatt Industrieproduktion). Strukturwandelforschung mit Blick auf den Energieverbrauch ist noch wenig verbreitet und daher einer der Schwerpunkte unserer projektbezogenen Forschung. Wir konnten u.a. feststellen, dass der Energieanteil im Sektorservice U-förmig verläuft, d.h. mit steigender Entwicklungsstufe wieder ansteigt.

Angelehnt an die ökonomische Literatur (Duarte und Restuccia, 2010) wurde ein multisektorales Wachstumsmodell konzipiert, implementiert und so kalibriert, dass die hervorspringenden Merkmale von Strukturwandel und Energienutzung für eine Gruppe von großen Volkswirtschaften reproduziert werden konnten. Die aktuelle Version des Modells unterscheidet 12 Länder bzw. Weltregionen, eine regionale Aufteilung, die dem Integrierten Bewertungsmodell (IAM) REMIND entspricht und daher den Datentransfer zwischen beiden Modellen erlaubt. Zur Sicherung der zukünftigen Integration des multisektoralen Wachstumsmodells in REMIND wurde der REMIND-Quellcode umstrukturiert und modularisiert. Das Ergebnis ist eine klare Schnittstelle zwischen den makroökonomischen und den Energiesystemteilen des IAM und eine verbesserte Fähigkeit, die Produktions-, Handels- und Wohlfahrtsfunktionen zu variieren.

Ein wesentliches Modellentwicklungsergebnis ist die Erstellung eines Energiesystememulators, der es dem multisektoralen Wachstumsmodell erst ermöglicht, Analysen im Kontext von Klimawandel und Klimapolitik durchzuführen. Der aktuelle Emulator umfasst Sätze linearer Angebotskurven, die sich je nach Region, Jahr und Endenergietyt unterscheiden. Die Angebotskurven werden durch lineare Regression und basierend auf einer Reihe von REMIND-Ergebnissen mit variierendem Endenergiebedarf erstellt. Darüber hinaus umfasst der Energiesystememulator Emissionskurven, welche CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von Art und Menge des Energieverbrauchs berechnen. Die Methodik, mit Hilfe der Emulatoren autonom auf Ergebnisse und Wirkungszusammenhänge des detaillierten REMIND-Modells zugreifen zu können ist einfach zu erweitern und auch durch andere Modelle nutzbar.

Das multisektorale Wachstumsmodell wurde darüber hinaus um ein Schadensmodul erweitert (Anwendung in WP 3.1). Die Emissionen, die anhand der Emissionskurven berechnet werden, führen zu einem Produktionsverlust, dessen Höhe durch eine Schadensfunktion mit sektor- und regions-

spezifischen Schadensparametern bestimmt wird. Die ausgewählte Schadensfunktion beschreibt den Produktionsverlust in Abhängigkeit des atmosphärischen Kohlenstoffvorrats. Die Schadensparameter kommen vom Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC) und sind aus einer linearen Relation von Produktionsverlust und Temperatur hergeleitet (van der Wijst u.a., 2022). In Abbildung 1 ist der sektor- und regionsspezifische prozentuale Produktionsverlust bei einer 3°C Erwärmung zu sehen. Die höchsten Verluste treten in Entwicklungsregionen wie Indien und Sub-Sahara Afrika auf. Ausnahmefälle stellen der Agrarsektor in Japan und in der „Nicht-EU“ Region, und der Industriesektor in China dar: sie erfahren einen Produktionsgewinn (negativen Verlust in der Abbildung).

	CAZ	CHA	EUR	IND	JPN	LAM	MEA	NEU	OAS	REF	SSA	USA
Agr	3.62%	1.44%	4.79%	13.2%	-0.25%	4.54%	7.51%	-3.92%	9.54%	0.87%	9.54%	1.80%
Man	3.66%	-1.70%	1.49%	18.8%	3.80%	5.38%	3.90%	1.43%	10.8%	3.84%	21.1%	3.26%
Ser	4.66%	2.47%	3.54%	12.8%	4.41%	4.87%	7.00%	2.59%	9.66%	5.06%	16.9%	3.73%

Abbildung 1: Produktionsverlust bei einer 3°C Erwärmung.

Erste wichtige Ergebnisse hinsichtlich der Interaktion von Klimawandel und Strukturwandel sind:

- die Energieproduktivität unterliegt wesentlich stärkere Schwankungen zwischen den Ländern und den Sektoren als Kapital- und Arbeitsproduktivität (diese Ergebnisse sind eng verbunden mit aktuellen wissenschaftlichen und politischen Nachhaltigkeitsdiskussionen, da die Verbesserung der Energieproduktivität als Schlüsselement hinsichtlich der nachhaltigen Bekämpfung des Klimawandels angesehen wird)
- generell ist die Energieproduktivität in entwickelten Ländern höher als in Entwicklungsländern
- Während in Ländern/Regionen wie China, Indien und Südostasien die Emissionsintensität im Industriesektor höher als im Sektorservice ist und damit der Strukturwandel zugunsten von Aktivitäten im Sektorservice emissionsmindernd wirkt, ist dies Sub-Sahara-Afrika und in den USA nicht der Fall. Um Emissionen zu senken kommt es hier vor allem darauf an den Dienstleistungssektor zu dekarbonisieren.
- Eine Robustheitsprüfung der Schadensparameter hat gezeigt, dass sich der Strukturwandel der Regionen je nach Entwicklungsstand mit steigenden Schäden anders entwickelt. In entwickelnden Regionen führen steigende Schäden zu einer, dem Strukturwandel entgegenwirkenden, Verlagerung der ökonomischen Aktivität in den Agrarsektor. In entwickelten Regionen jedoch führen steigende Schäden zu einer weiteren Verlagerung der ökonomischen Aktivität in den Dienstleistungssektor. Demnach sind Entwicklungsländer durch Schäden des Klimawandels in Bezug auf ihren Strukturwandel nachteilig beeinflusst, wobei das Gegenteil für entwickelte Regionen gilt.

II.1.5 Arbeitspaket 2.1: Handel als Treiber von Strukturwandel unter dem Einfluss von Klimaänderung (IfW)

Arbeitspaket 2.1 wurde innerhalb von Teilprojekt D am Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW) bearbeitet. Es wurde untersucht, wie sich klimabedingte Ertragsänderungen im Agrarsektor auf die sektoralen Spezialisierungsmuster der Länder auswirken. Produktivitätsschocks können die internationalen komparativen Vorteile und damit die Muster der sektoralen Spezialisierung durch Veränderungen bei Importen und Exporten verschieben. Ziel des Arbeitspakets ist es die Adaptionmöglichkeiten durch Handelskosten (Zölle, nichttarifäre Handelshemmnisse, Logistikkosten) zu untersuchen. Sind die Handelskosten ausreichend niedrig, können sich Länder aus der Landwirtschaft zurückziehen, sich im verarbeitenden Gewerbe oder im Dienstleistungssektor spezialisieren und von positiven Ertragseffekten in anderen Teilen der Welt profitieren. Sind die Handelskosten dagegen hoch, könnten ungünstige Produktivitätsschocks in der Landwirtschaft dazu führen, dass ein höherer Anteil der mobilen Ressourcen in diesen Sektor fließt, um Defizite auszugleichen.

Wir führten Simulationsexperimente in Bezug auf die Handelskosten durch, die Aufschluss über die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels in verschiedenen Schwerpunktländern geben sollen. Dazu entwickelten wir das „Kiel Institute Trade Policy Evaluation“ (KITE) Modell. Mit KITE konnten wir analysieren, wie sich regional unterschiedliche Schocks der landwirtschaftlichen Erträge auf die Handelsströme aller Länder der Welt auswirken in Abhängigkeit von den jeweiligen Handelskosten.

KITE baut auf den theoretischen Arbeiten von Eaton und Kortum (2002) und Caliendo und Parro (2015) auf. Wir haben einen räumlich und sektoral spezifischen „Produktivitätsshifter“ in das Modell eingefügt. Hierdurch können wir jeden Landwirtschaftssektor in jedem Land mit einer spezifischen Ertragsveränderungen „schocken“. Diese Erweiterung ist ebenfalls eine notwendige Vorarbeit für das projektübergreifende Arbeitspaket 4.4.

Die Ertragsveränderungen leiten wir aus der aktuellsten Version der Global Agro-Ecological Zones Datenbank (GAEZ) der FAO/IIASA ab (Fischer u.a., 2021). GAEZ kombiniert einen standardisierten Rahmen für die Charakterisierung von Klima-, Boden- und Geländebedingungen, die für die landwirtschaftliche Produktion relevant sind. GAEZ berechnet systematisch räumliche und zeitliche Daten zu den maximal erzielbaren Ernteerträgen, ermittelt die leistungsfähigsten Kulturarten und schätzt das landwirtschaftliche Produktionspotenzial bei verschiedenen Betriebsmitteln und Bewirtschaftungsbedingungen. Die GAEZ-Berechnungen wurden für eine Reihe von Klimabedingungen durchgeführt, einschließlich historischer Referenzzeiträume und einer Auswahl zukünftiger Klimasimulationen unter Verwendung der jüngsten Ergebnisse des IPCC AR5 Earth System Model (ESM) für vier repräsentative Konzentrationspfade (RCPs). Die GAEZ-Ergebnisse quantifizieren konsistent die Auswirkungen historischer Klimabedingungen sowie potenzieller zukünftiger Klimaveränderungen auf die Landproduktivität. GAEZ-Daten liegen in einer Auflösung von 5 Bogenminuten (9 x 9km auf Höhe des Äquators). Insgesamt liegen Ertragsdaten von über 4 Millionen Zellen für den gesamten Globus vor. Wir nutzen verschiedene ESMs und RCPs, um die Variabilität und Unsicherheit des zukünftigen Klimas abzubilden. Die Zellwerte werden pro landwirtschaftlichen Sektor auf Länderebene aggregiert.

Für die Datengrundlage von KITE haben wir die aktuellste Version von der Global Trade Analysis Project Datenbank (GTAP) aufbereitet (Aguiar u.a., 2019). Die aktuelle Version GTAP 10 umfasst 141 Länder und 65 Sektoren (11 in der Landwirtschaft). Die Fokusregion Indien ist in GTAP 10 enthalten. Wir haben einen Algorithmus entwickelt mit dem Indien in seine 29 Bundesstaaten disaggregiert werden kann (Kutsch und Mahlkow 2022). Diese Erweiterung ist für die projektübergreifenden Arbeitspakete 4.3 und 4.4 von großem Nutzen.

Im Durchschnitt über die verschiedenen Klimaszenarien hinweg zählt Indien zu den Wohlfahrtsverlierern, während Deutschland einen leichten Gewinn erzielen kann. Bei restriktiver Handelspolitik (Autarkie) verlieren beide Länder an Wohlfahrt. Die Verluste sind in Deutschland größer, da Deutschland abhängiger vom internationalen Handel ist. Die indische Produktion ist stärker auf die einheimische Nachfrage ausgerichtet, wodurch sich der Strukturwandel in Grenzen hält. In Deutschland hingegen wandern mehr Arbeiter von den Industrie- in die Landwirtschafts- und Dienstleistungssektoren, um den einheimischen Bedarf zu decken. Eine Handelsliberalisierung, die Abschaffung aller Zölle, steigert die Wohlfahrt in beiden Ländern. In Indien können die negativen Wohlfahrtseffekte des Klimawandels kompensiert werden, indem sich die einheimische Produktion auf exportstarke Wirtschaftszweige verlagert. Das sind allen voran Dienstleistungen und die Rohstoff- und Textilindustrie (Mahlkow 2022b).

II.1.6 Arbeitspaket 2.2: Länderspezifische Effekte von klimabedingtem Strukturwandel (IfW)

Arbeitspaket 2.2 wurde innerhalb von Teilprojekt D am Kiel Institut für Weltwirtschaft (IfW) bearbeitet. Es wurde untersucht, wie sich klimabedingte Ertragsänderungen im Agrarsektor auf die sektoralen Spezialisierungsmuster einer großen Anzahl an Ländern auswirken. Hiermit setzt es die Untersuchung von Arbeitspaket 2.1 fort, erweitert aber den Analysehorizont auf eine globale Perspektive. Im Gegensatz zum vorangegangenen Arbeitspaket werden nicht länger nur zwei Fokusländer (Indien und Deutschland) untersucht, sondern globale Hot-Spots des klimabedingten Strukturwandels analysiert.

Neben der Untersuchung von handelspolitischen *Adaptionsmaßnahmen* an den Klimawandel haben wir uns angeschaut, welchen Effekt Handelspolitik auf die *Mitigation* des Klimawandels hat. Hierzu haben wir CO₂-Accounting in das Handelsmodell KITE eingebaut (Mahlkow und Wanner, 2021). Dieses war eine wichtige Vorleistung, um CO₂-Preise in KITE zu integrieren (Mahlkow u.a., 2021), die für die Szenarienberechnungen des projektübergreifenden Arbeitspakets 4.4 benötigt wurde.

Die länderübergreifende Analyse zeigt, dass die klimainduzierten Produktivitätsschocks die größten Wohlfahrtseffekte in Afrika und Asien haben, sowohl positiv als auch negativ. Bei derzeitigen Handelskosten und ohne eine Anpassung der Handelspolitik gewinnen Länder wie Äthiopien, Ruanda, Tadschikistan und Pakistan, während Länder wie Nigeria, Ghana, Kambodscha und Laos deutlich verlieren. Die Heterogenität in den Entwicklungs- und Schwellenländern beruht mehr auf den Unterschieden in den klimainduzierten Produktivitätsschocks als in der länderspezifischen Handelspolitik. Um die Heterogenität darzustellen war die Nutzung der Input-Output Tabelle GTAP 10

entscheidend. Mit der räumlichen Auflösung von 141 Ländern war es möglich lokale Klimaeffekte darzustellen, die ansonsten in einer aggregierten Input-Output Tabelle verloren gehen. Von der aufwändigen Nutzbarmachung von GTAP 10 für KITE haben mehrere wissenschaftliche Veröffentlichungen profitiert (vgl. Balma u.a., 2022; Felbermayr u.a., 2023; Chowdhry u.a., 2022).

II.1.7 Arbeitspaket 3.1: Effektivität von Klimapolitik in Strukturwandelszenarien (PIK)

Ein wesentliches Ergebnis dieses Arbeitspaketes sind Strukturwandelszenarien. Sie stellen einerseits ein selbständiges Produkt dar, bilden andererseits einen wesentlichen Input für andere Arbeitspakete. Darüber hinaus spielen sie eine wichtige Rolle, um im Kontext des Projektes, Klimaschäden und die Wirksamkeit von Klimapolitik zu analysieren. Wir haben einen ökonometrischen Ansatz erstellt, der die Entwicklung von sektoralen Beschäftigungs-, Wertschöpfungs- und Energieanteilen bis 2050 projiziert. Diese Projektionen sind von uns erstellt worden für alle Länder als auch für 12 Weltregionen sowie differenziert entlang verschiedener sozio-ökonomischer Szenarien (SSPs). Die Projektionsergebnisse zeigen, dass z.B. in einer SSP3-Welt der Strukturwandel fast zum Erliegen kommt. Die fehlende Industrialisierung könnte in unterentwickelten Regionen wie Sub-Sahara Afrika sowohl die Anpassung an den Klimawandel erschweren als auch die notwendigen Investitionen in den klimaneutralen Umbau von Volkswirtschaften verhindern. Die Studie zu den SSP-Strukturwandelszenarien wurde bei der internationalen Fachzeitschrift „Futures“ eingereicht. Als Teil der Erstellung der Strukturwandelszenarien ist eine Aktualisierung der zugrunde liegenden GDP-Szenarien nötig geworden. Dieser Prozess schließt sowohl die Berücksichtigung der Covid-19-Krise mit ein als auch die Anpassung der SSP GDP-Szenarien an die kurzfristigen Trends und Umstellungen im GDP-Accounting (siehe Arbeitspaket 3.2).

Das in Arbeitspaket 1.4. entwickelte multisektorale Wachstumsmodell wurde durch die Integration eines Emissionsmoduls (Emulator), sowie einer Klimaimpakt- und Klimapolitikkomponente zu einem integrierten Bewertungsmodell ausgebaut, welches in der Lage ist, die Wechselwirkung von Strukturwandel, Klimaänderung und Klimaschutz zu untersuchen. Durch die Unterscheidung von elektrischer und nicht-elektrischer Energienutzung und der Modellierung der sehr unterschiedlichen Dekarbonisierungspotentiale beider Energieformen ist eine detailliertere Analyse von Klimastabilisierungsszenarien (z.B. 2°C) möglich. In einer Anwendung liefert das Modell Projektionen, die helfen, Klimaschuttszenarien mit unterschiedlichen Annahmen zu internationaler Koordination zu vergleichen. In Szenarien ohne Koordination werden Schäden, die nationale Emissionen für andere Staaten verursachen („Klimaexternalität“) im Unterschied zum Szenarium mit internationaler Koordination nicht bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Der Vergleich zwischen Szenarien mit und ohne Koordination zeigt, dass Koordination zu einer Reduktion der Emissionsintensität in allen Regionen, und einem globalen Wohlfahrtsgewinn führt: die Emissionsreduktion, die überwiegend in entwickelten Regionen stattfindet, führt zu niedrigeren globalen Schäden und ermöglicht mehr Konsum in Entwicklungsregionen. Die regionalen Emissionsintensitäten werden dabei auf verschiedener Art reduziert (siehe Abbildung 2): entweder durch eine Verringerung der Emissionsintensität der einzelnen Sektoren (durch Nutzung von weniger oder sauberer Energie – blaue Balken in Abbildung 2) oder durch eine Verschiebung der ökonomischen Aktivität in Sektoren mit niedriger Emissionsintensität (rote Balken

in Abbildung 2). Die sektorale Umstrukturierung spielt dabei eine kleinere, aber nicht zu vernachlässigende Rolle.

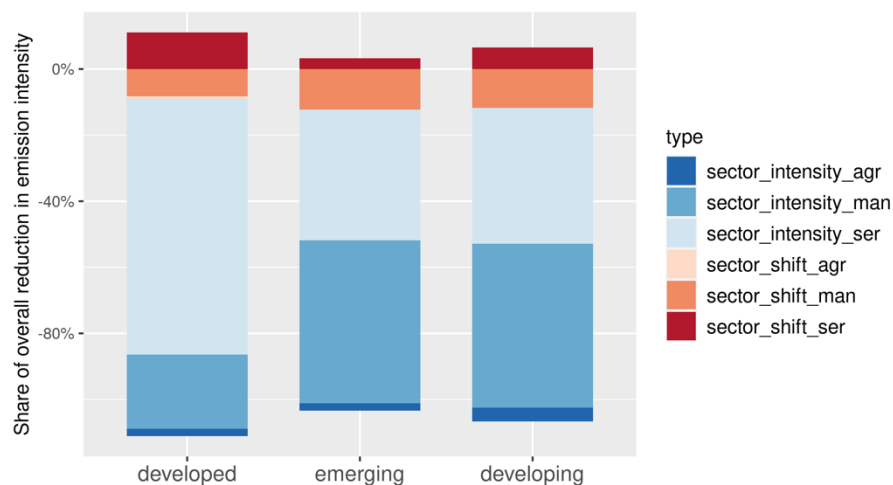


Abbildung 2: Dekomposition der Reduktion der Emissionsintensität

II.1.8 Arbeitspaket 3.2: Globale Transformationspfade (PIK)

Wesentliches Ergebnis dieses Arbeitspaketes im Sinne des Gesamtprojektes ist ein Satz von REMIND-Ergebnissen für verschiedene vordefinierte Szenarien. Das Szenariendesign erfolgte in einem mehrstufigen Ansatz. Darin eingeschlossen war ein interaktiver Stakeholderdialog in dessen Ergebnis relevante Szenarienmerkmale identifiziert und klassifiziert wurden. Aus den daraus abgeleiteten Szenarien wurden jene ausgewählt, die für eine gemeinsame Projektstudie berechnet werden sollen. Neben der Strukturwandeldimension, die teilweise durch die Szenarien aus Arbeitspaket 3.1 abgedeckt werden, ist die Klimapolitikdimension spezifiziert worden. Sie beinhaltet Baselineszenarien und 2°C-Stabilisierungsszenarien bzw. Klimapolitikszenerien mit entsprechender CO₂-Bepreisung. Baseline- und Klimapolitikszenerien (mit Standardannahmen zum Strukturwandel) sind dann mit dem REMIND-Modell berechnet worden. Szenarioutput (CO₂-preise, Energiepreise usw.) wurde im Arbeitspaket 4.4 weiter verwendet. Die genutzten Szenarien sind hinsichtlich der Implikationen für die Transformationspfade in anderen Studien und Veröffentlichungen (z.B. Luderer u.a., 2022) beschrieben. Die Aktivitäten in diesem Arbeitspaket konzentrierten sich daher stärker auf die Aktualisierung der sozio-ökonomischen Szenarien (SSPs) als auf die Analyse abgeleiteter Transformationsszenarien.

Basierend auf neuen empirischen Daten und einer konsistenten methodischen Basis wurde der gesamte Satz an SSP-GDP-Szenarien überarbeitet. Ein Working Paper wurde veröffentlicht (https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4011838) und eine überarbeitete Version bei den internationalen Zeitschriften „Ecological Economics“ eingereicht. Die neuen SSP-GDP-pro-Kopf-Szenarien sind das Ergebnis einer Harmonisierung der ursprünglichen SSP-Projektionen (OECD-GDP-Szenarien – Dellink u.a., 2017) aus der IIASA SSP-Datenbank mit aktuellen Daten aus der World

Development Indicator Database (WDI) der Weltbank und aus dem World Economic Outlook des Internationalen Währungsfonds. Sie berücksichtigen zudem neue SSP-Bevölkerungsprojektionen (IIASA/Wittgenstein-Zentrum) und sind von 2010 bis 2030 als jährliche Daten und danach bis 2100 in 5-Jahres-Schritten verfügbar. Für die Jahre bis 2020 stimmen sie mit den Daten des WDI überein. Für die Jahre zwischen 2021 und 2026 folgen sie den kurzfristigen Schätzungen des WEO für das Pro-Kopf-GDP-Wachstum, die die Wachstumsauswirkungen des Corona-Schocks abdecken. Zwischen 2026 und 2100 folgen die Szenarien einem Pfad, der sie bis 2100 in unterschiedlicher Geschwindigkeit für die verschiedenen SSPs zum ursprünglichen Pro-Kopf-GDP relativ zu dem der USA zurückführt.

II.1.9 Arbeitspaket 4.1: Verteilungseffekte zwischen Ländern (PIK)

Als wesentliches Ergebnis dieses Arbeitspaketes wurde eine Studie in einem internationalem Fachjournal veröffentlicht (Leimbach & Giannousakis, 2019). Darin untersuchen wir die Lastenverteilung für die Stabilisierung des Weltklimas unter verschiedenen sozio-ökonomischen Szenarien und verschiedenen Klimapolitikregimen. Diese Studie zeigt, dass auf Fairnesskriterien beruhende Klimapolitikregime (z.B. gleiche pro-Kopf-Verteilung von Emissionszertifikaten) bessere Chancen auf politische Durchsetzbarkeit haben als alternative Klimapolitikregime (z.B. globale CO₂-Steuern oder Grandfathering). Gleichzeitig konnten wir zeigen, dass ein nachhaltiger Entwicklungspfad entlang SSP1 eine faire Lastenteilung erleichtert. Eine auf die Nutzung fossiler Rohstoffe beruhende Entwicklung entlang SSP5 verhindert hingegen die politische Durchsetzbarkeit einer fairen Lastenteilung aufgrund der hohen Varianz der regionalen Vermeidungskosten oder den nötigen hohen finanziellen Transfers. In einer weiteren Studie (Leimbach und Bauer, 2022) konnten wir zeigen, wie sich unter den Bedingungen imperfekter Kapitalmärkte die Lastenverteilung zwischen den Regionen verändert. Insbesondere fanden wir heraus, dass sich die Vermeidungskosten für energieexportierende Länder reduzieren, was deren Bereitschaft zur Beteiligung an Klimaschutzmaßnahmen erhöhen könnte.

Weitere Ergebnisse liegen hinsichtlich der Verteilungseffekte aus der Interaktion von Klima- und Strukturwandel vor. Mit Hilfe des in Arbeitspaket 3.1 entwickelten multisektoralen Integrierten Bewertungsmodell untersuchten wir die Wohlfahrtseffekte internationaler Kooperation – gemessen in Konsumäquivalenten. Die Resultate zeigen erwartungsgemäß, dass von einer kooperativen Klimaschutzpolitik insbesondere Regionen profitieren, die ein großes Schadensrisiko haben (Afrika, Indien, Südostasien). Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass bei Regionen mit vergleichbarem Schadenspotential, jene stärkere Reduktionslasten tragen, die ein höheres CO₂-Einsparpotential vorweisen, z.B. die USA im Vergleich zur EU. Die Ergebnisse der Studie sind in einem Arbeitspapier zusammengefasst, das zur Präsentation bei der IAMC-Konferenz 2022 vorgestellt wurde (Marcolino u.a., 2022b).

II.1.10 Arbeitspaket 4.2: Verteilungseffekte auf nationaler und sektoraler Ebene (JLU)

Arbeitspaket 4.2 wurde innerhalb von Teilprojekt C an der Justus-Liebig-Universität (JLU) Gießen bearbeitet. Es hat das Ziel, die Verteilungseffekte von Klima- und Handelspolitik in Deutschland unter Berücksichtigung sektoraler Verschiebungen mit Hilfe eines erweiterten Handelsmodells zu untersuchen. Die Simulationsergebnisse sind sowohl für die derzeitige deutsche Klima- und Energiepolitik als auch für Arbeitspaket 4.5: „Maßnahmen zur Vermeidung negativer Verteilungseffekte“ relevant. Eine neue Modellvariante mit dem Fokus auf Indien dient der Simulation von Strukturwandelszenarien in Arbeitspaket 4.4: „Gekoppelte Modellanalyse von Verteilungseffekten“.

Den Arbeitspaketen 4.2, 4.4 und 4.5 liegen ebenfalls etablierte und moderne Handelstheorien zugrunde (Ricardo, Heckscher-Ohlin, Eaton & Kortum 2002, Melitz 2003). Die Arbeitspakete 4.2, 4.4 und 4.5 bauen auf bestehenden numerischen Handelsmodellen zur Analyse von Klima- und Energiepolitik in einer globalisierten Welt auf (Thomas Rutherfords Modelle, Caliendo & Parro 2015, Pothen & Hübler 2018). Datengrundlage bilden der Datensatz Global Trade Analysis Project (GTAP, 9 & 10) sowie die deutsche Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS, 2013).

Schwerpunktmäßig haben wir die in Arbeitspaket 4.2 unseres Projektantrags dargestellte Modellentwicklung mit einer Aufspaltung des deutschen repräsentativen Konsumenten in Einkommensgruppen zur Identifikation von nachfrageseitigen Verteilungseffekten von Klimapolitik erfolgreich bearbeitet. Das benötigte Modell haben wir mit der aus Projektmitteln erworbenen Programmiersprache/Software General Algebraic Modeling System (GAMS) mit dem Interface Mathematical Programming System for General Equilibrium (MPSGE) neu erstellt. Mit Hilfe der erworbenen Haushaltsdaten aus der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) des Statistischen Bundesamtes haben wir die Einnahmen und Ausgaben des deutschen repräsentativen Konsumenten in wahlweise drei, fünf oder zehn Einkommensklassen aufgeteilt. Die somit gewonnenen Daten haben wir in ein Rechenbares Allgemeines Gleichgewichtsmodell implementiert, das wir ausgehend von einem Basismodell eigens für das Rochade-Projekt entwickelt haben. Hierzu haben wir Parameterwerte aus dem Handelsmodell von Pothen & Hübler (2018) übernommen. Hierbei haben wir ein Update der beiden Modelle zugrunde liegenden globalen GTAP-Daten auf die aktuelle Version 10 vorgenommen, die wir aus Projektmitteln erworben hatten. Die regionale Disaggregation Deutschlands haben wir an die Analyse angepasst. Bzgl. der Disaggregation Deutschlands in Bundesländer bzw. subnationale Regionen in Allgemeinen Gleichgewichtsmodellen haben wir systematisch Datenquellen und -lücken identifiziert und übersichtlich dargestellt (Braun & Keimes 2022). Die für Arbeitspaket 4.2 erstellte Daten- und Modellanalyse erschien als Arbeitspapier (Hübler u.a., 2022) und wurde bei einem wissenschaftlichen Journal zur Begutachtung eingereicht.

Mit Hilfe unseres neu erstellten Modells konnten wir sowohl Klimapolitik zur CO₂-Reduktion in Deutschland (Europa), als auch die geplante CO₂-Bepreisung von Importen in die EU bzgl. Ihrer Auswirkungen auf verschiedene Einkommensklassen deutscher Haushalte (Konsumenten) analysieren. Es zeigt sich (siehe Abbildung 3), dass konsumseitige Preissteigerungen durch Klimapolitik besonders die ärmeren deutschen Haushalte treffen, während die einkommensseitigen Einbußen bzgl. Einkommen aus Kapital und Arbeit dagegen besonders die reichen deutschen Haushalte treffen. Landrenten steigen

hierbei implizit durch die steigende Nachfrage nach Standorten für erneuerbare Energie. Ärmere Haushalte können summa summarum von der Klimapolitik profitieren, sofern die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung nach einem Pro-Kopf-Schlüssel an die Haushalte weitergegeben werden. Die zusätzliche Einführung der CO₂-Bepreisung von Importen in die EU (CO₂-Grenzausgleichsmechanismus) verstärkt diese Verteilungseffekte der CO₂-Bepreisung.

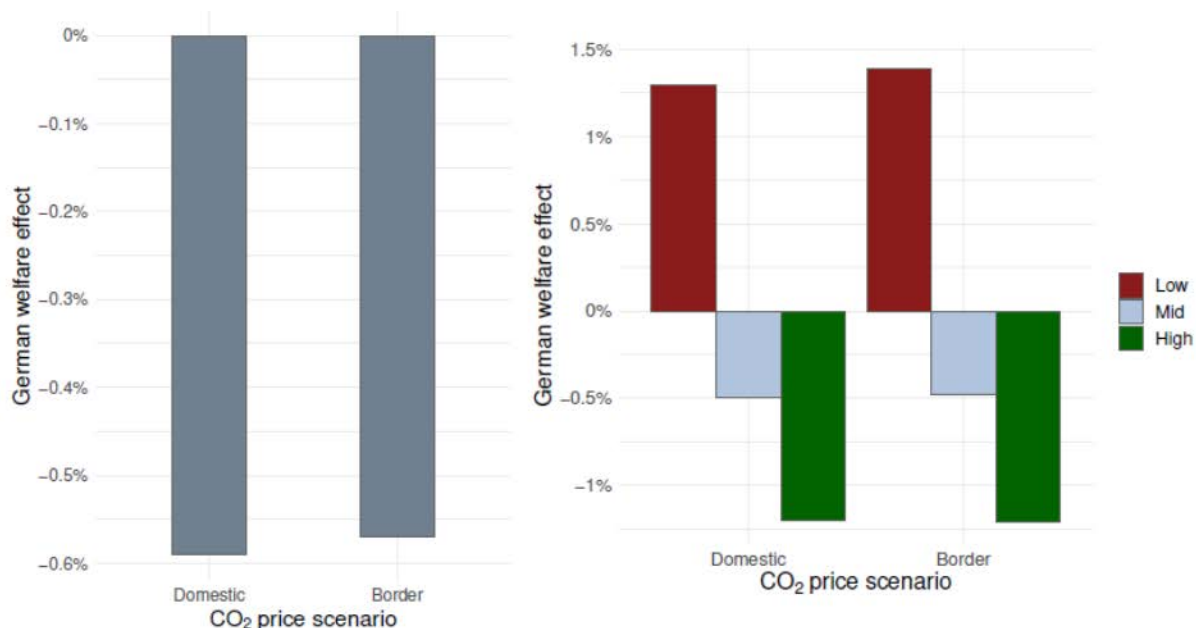


Abbildung 3: Wohlfahrtseffekte von EU-Klimapolitik auf die deutsche Wohlfahrt (links) und auf deutsche Einkommensgruppen (rechts). Domestic: nur EU-Klimapolitik, Border: zusätzlich CO₂-Grenzausgleich.

Basierend auf dem statischen Modell (Pothen & Hübler 2018) hatten wir bereits vor dem Projekt eine dynamische Modellversion mit dem Schwerpunkt Deutschland und einem Zeithorizont bis 2050 erstellt. Das zugrunde liegende Arbeitspapier haben wir im Rahmen des Rochade-Projekts für die Publikation in „Energy Economics“ (Pothen & Hübler 2021) überarbeitet und finalisiert. Aus den evaluierten Szenarien ergibt sich für das Rochade-Projekt, dass Strukturwandel, Energieeffizienzverbesserungen und nahezu 100% Elektrizität aus erneuerbaren Quellen die Kosten der Klimapolitik in Deutschland in etwa kompensieren können.

Basierend auf dem dynamischen Modell präsentierten und diskutierten wir im Rahmen unseres Stakeholder-Workshops in 2020 in Berlin langfristige sektorale Verteilungseffekte von Klimapolitik (Kohle- und Atomausstieg) in Deutschland. In diesem Zusammenhang nahmen wir in 2020 im Rahmen des Dialogs zur Klimaökonomie am Fachworkshop TSP 1 „Fossil Fuel Phase-out & Just Transformation“ in Berlin teil. Wir beteiligten uns auch am daraus resultierenden Politikartikel mit Hintergrundinformationen zum Kohleausstieg (Kriegler u.a., 2020).

Basierend auf dem statischen Modell (Pothen & Hübler 2018) hatten wir bereits vor dem Projektbeginn eine weitere Modellvariante mit dem Schwerpunkt Singapur und Südostasien erstellt. In den

durchgeführten (Handels-) Politikanalysen geht es um die Reduktion von Externalitäten der Sandextraktion. Die Problematik der Sandknappheit wurde in der ökonomischen Literatur bisher nahezu ignoriert. Im Rahmen des Projekts entwickelten wir unsere Forschungsarbeit weiter und publizierten sie in dem renommierten allgemeinwissenschaftlichen Journal „Plos One“ (Hübler & Pothen 2021). Unsere Arbeit wurde anlässlich der Publikation des neuen UNEP-Berichts zum globalen Sandproblem in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung online zitiert (F.A.Z. online 2022). In dieser Forschungsarbeit übertragen wir einschlägige Klimapolitikinstrumente auf die Reduzierung des umweltschädlichen Sandabbaus in Südostasien. Wir betrachten sowohl Einfuhr- und Ausfuhrzölle als auch eine Extraktionssteuer bzw. ein entsprechendes Zertifikathandelssystem. Da Sand insbesondere in der Zementherstellung im Bauwesen Verwendung findet und die Zementherstellung CO₂-intensiv ist, tragen die betrachteten Politiken auch zur CO₂-Reduktion bei. Die untersuchten Politiken führen zu unterschiedlichen Verteilungseffekten zwischen den (südostasiatischen) Sandexporteuren und dem Sandimporteur (in dem Fall Singapur). Die Ergebnisse sprechen für eine einheitliche Sandabbausteuer und sind auch für Deutschland und andere Sandimporteure bedeutsam. Die resultierende Verteuerung von sandbasierten Baustoffen und -aktivitäten soll die Wettbewerbsfähigkeit und Weiterentwicklung von recycelten Baustoffen und (natürlichen) Ersatzmaterialien unterstützen und somit eine Art Strukturwandel im Bauwesen fördern.

In 2019 präsentierten wir im Rahmen der Jahreskonferenz zur ökonomischen Modellierung und Ökonometrie (Economic Modelling, EcoMod) in Spanien beide neue Modellvarianten mit den Schwerpunkten Deutschland und Singapur (Pothen & Hübler 2021, Hübler & Pothen 2021). In 2019 präsentierten wir außerdem eine Forschungsarbeit über Agrarentwicklung bei klimabedingter Wasserknappheit im Rahmen der Jahreskonferenz der kanadischen ökonomischen Vereinigung (Canadian Economics Association, CEA).

Diese Forschungsarbeit hatten wir bereits vor dem Projekt begonnen und entwickelten sie in Zusammenarbeit mit Herrn Schwerhoff (Internationaler Währungsfond, IMF, Washington, D. C.) grundlegend weiter (Hübler & Schwerhoff 2022, konditional akzeptiert in der neuen hochrangigen Fachzeitschrift „Journal of the Association of Environmental and Resource Economists“). In dieser Forschungsarbeit analysieren wir Strukturwandel hinsichtlich Technologieadaptation im Agrarbereich von Entwicklungsländern im Kontext Klimawandel und Wasserknappheit. Beispielhaft wenden wir das Modell numerisch auf die Kaffeeproduktion in Vietnam an. Wir identifizieren eine neue Art von Rebound-Effekt (Jevons-Paradox), d. h., eine erhöhte Umweltbelastung durch Markteintritt von weiteren Produzenten bzw. Kleinbauern aufgrund von technischen Produktivitätsverbesserungen. Die Förderung des Markteintritts oder von neuen Technologien kann hierbei nachteilige Verteilungseffekte für weniger produktive Kleinbauern hervorrufen. Sekundäre Effekte des Klimawandels wie Beschäftigungseffekte fallen im Ergebnis numerisch stärker aus als der ursprüngliche wetterbedingte Schock.

In Kooperation mit Frau Fischer (Freie Universität Amsterdam, Resources for the Future, Washington, D. C.) und Herrn Schenker (Frankfurt School of Finance & Management) untersuchten wir technologischen Strukturwandel und Verteilungseffekte im europäischen Energiesystem durch Klima-, Energie- und Technologieförderungspolitik basierend auf unserer bestehenden Forschungsarbeit zu „Second-best-

Politiken“, d. h., dem Zusammenspiel von Politikinstrumenten unter einschränkenden Rahmenbedingungen. Wir entwickelten diese Arbeit im Rahmen der Projektlaufzeit weiter, so dass sie schließlich in der hochrangigen ökonomischen Zeitschrift „Journal of Public Economics“ publiziert wurde (Fischer u.a., 2021). Strukturwandel besteht in dieser Arbeit in der technologischen Verbesserung der Elektrizitätserzeugung und der Energieeffizienz. Eine Verteilungsanalyse zeigt, dass bei nicht hinreichender Verfügbarkeit von Produktionssubventionen die optimale Anpassung einer Stromsteuer deutliche Kosten für Konsumenten, aber nur geringfügige Vorteile für Produzenten erzeugt. Wenn Forschungs- und Entwicklungssubventionen nicht hinreichend verfügbar sind, können Produktionssubventionen als Ersatz angepasst werden, was den erneuerbaren Energien zugutekommt, aber die Konsumenten belastet. Wenn keine Förderung von Energieeffizienzverbesserungen verfügbar ist, so kann die Stromsteuer entsprechend erhöht werden, um Energie zu verteuern und Energieeffizienzmaßnahmen lohnender zu machen, was wiederum den energieeffizienter gewordenen Konsumenten zugutekommt und von den Produzenten finanziert wird. Diese Ergebnisse sind für Deutschland und die anderen EU-Staaten, die am europäischen Emissionshandel teilnehmen und gleichzeitig eigene Klima- und Energiepolitiken eingeführt haben, relevant.

II.1.11 Arbeitspaket 4.3: Verteilungseffekte auf Haushaltsebene (MCC)

Wir haben ein Haushaltsmodell entwickelt, das es uns ermöglicht, eine Mikrosimulation durchzuführen, die a) auf den Ergebnissen der Makro- und Mesomodelle für Indien und b) auf der Verteilung von Beschäftigung, Einkommen und Ausgaben in Indien basiert, wie sie in der Haushaltsbefragung 2012 (NSS 68. Runde) beobachtet wurde. Anhand der Daten der Haushaltserhebung berechnen wir das Einkommen jedes indischen Haushalts auf der Grundlage der Gesamtausgaben pro Kopf und ordnen jeden Haushalt auf der Grundlage seines Einkommens einem von fünf Einkommensquintilen zu. Darüber hinaus klassifizieren wir jeden Haushalt anhand des Beschäftigungssektors des Haushaltsvorstands. Schließlich berechnen wir die Ausgabenanteile der Haushalte für Waren und Dienstleistungen in den einzelnen Produktionssektoren, die in den Handelsmodellen definiert sind. Das so konstruierte Haushaltsmodell ist in der Lage, Ergebnisse aus den Modellen REMIND, KITE und JUST auf Haushaltsebene zu übersetzen. Durch Preis- und Einkommensänderungen verursachte Konsumanpassungen können für die fünf Einkommensquintile zwischen verschiedenen Szenarien verglichen und zur Berechnung von Verteilungswirkungen genutzt werden. Das Modell wird detailliert in Leimbach u.a. (2022b) beschrieben.

Wesentliche Vorarbeiten zur Bewertung der Verteilungseffekte von Klimaschutz wurden auch anhand des indischen Kohlesektors und eines potenziellen Ausstiegs beschrieben. Die Ergebnisse sind bei einer internationalen Fachzeitschrift zur überarbeiteten Wiedereinreichung aufgefordert worden (Ordonez u.a., 2022). Dabei schauen wir uns anhand des indischen Kohlesektors die Auswirkungen eines Kohleausstiegs auf verschiedene Bevölkerungsgruppen an (inkl. Kohlearbeiter, arme Menschen und auch Industrie) und vergleichen die Auswirkungen regional. Ein Fokus liegt dabei auf dem durch den Kohleausstieg induzierten Strukturwandel. Wir entwickelten dafür einen qualitativen Rahmen, der es ermöglicht, verschiedene Dimensionen der Übergänge zu vergleichen. Wir verwenden einen auf Input-Output-Modellen basierenden Rahmen für die Inzidenzanalyse und verknüpfen diesen Ansatz des

partiellen Gleichgewichts mit Daten auf Bundesstaatsebene für Haushalte, Industrie und Beschäftigung. Die von uns gewählte Methodik ermöglicht es uns, Mikrosimulationen durchzuführen, die die geografische Dimension der Verteilungsauswirkungen berücksichtigen, und die Ergebnisse konsistent auf Bundesstaatsebene zu berechnen und auszuweisen. Auf der Grundlage dieses Analyserahmens konzentrieren wir unsere Diskussion und den Hauptbeitrag unseres Papiers auf die Identifizierung der Verteilung günstiger und ungünstiger Bedingungen für eine Energiewende in den verschiedenen indischen Staaten.

II.1.12 Arbeitspaket 4.4: Gekoppelte Modellanalyse von Verteilungseffekten (PIK, all)

Als Ergebnis der teilprojektübergreifenden Arbeit in diesem Arbeitspaket wurde eine Fallstudie zur Untersuchung von Verteilungseffekten aus der Interaktion von Klimapolitik und Strukturwandel durchgeführt. Die Studie erfolgte in einem innovativen Modellrahmen, bei dem in einer dreistufigen Kaskade alle Modelle der im Projekt beteiligten Institutionen miteinander gekoppelt wurden. Aufgrund des mehrdimensionalen Aufbaus (Vergleich zwischen Klimapolitik und Strukturwandel, Vergleich zwischen verschiedenen SSPs, Vergleich zwischen verschiedenen Haushaltsgruppen) wurde auf die gesonderte Analyse von Klimapolitiksszenarien mit „Klimafinanzierung“ verzichtet.

Für ausgewählte Szenarien untersucht die Fallstudie Preis- und Einkommensveränderungen im Zeitraum zwischen 2015 und 2030 sowie die sich daraus ergebenden Verteilungseffekte (Verteilung auf fünf Einkommensgruppen). Während die allgemeine ökonomische und demografische Entwicklung verschiedenen SSP-Szenarien folgt, wird ein Klimapolitiksszenario formuliert, das ein 2 °C Klimastabilisierungsziel beinhaltet und für das mit dem IA-Modell REMIND (PIK) ein CO₂-Preispfad für Indien berechnet wird. Der Einfluss des Strukturwandels wird durch zwei Szenarien untersucht, die entweder eine Veränderung der sektoralen Wertschöpfung und der Produktivitäten annehmen oder deren Anteile konstant halten. Die von den Makromodellen gelieferten Szenarioinformationen werden von den beiden Handelsmodellen JUST (JLU) und KITE (IfW) aufgenommen. Beide Modelle wurden für diese Studie weiterentwickelt und angepasst. Mit beiden werden sektoral aufgelöste Informationen von Preis- und Outputveränderungen im allgemeinen globalen wirtschaftlichen Gleichgewicht berechnet. Diese Daten werden wiederum vom Haushaltmodell (MCC) aufgenommen und weiterverarbeitet. Das Haushaltmodell benutzt zunächst empirische Daten (Statistische Haushaltsbefragung 2012), um die Haushalte entsprechend ihrer Ausgabenanteile und ihrer Beschäftigungsanteile zu klassifizieren. Basierend auf den berechneten Preisänderungen und den Ausgabenanteilen berechnet das Modell Konsumveränderungen. In ähnlicher Weise werden Einkommensveränderung auf der Basis der Beschäftigungsanteile und der Entwicklung der sektoralen Wertschöpfung berechnet.

Die mit der Fallstudie durchgeführte klimapolitische Verteilungsanalyse kann durch die zusätzliche Fokussierung auf den ökonomischen Strukturwandel und die Breite des methodischen Ansatzes (dreistufige Modellkaskade) als erste ihrer Art bezeichnet werden. Die Studie führte zu wesentlichen sowohl wissenschaftlich als auch politische relevanten Erkenntnissen:

- 1) Aggregiert über alle Haushalte: Sowohl Klimapolitik als auch sektoraler Strukturwandel (Landwirtschaft, Industrie, Dienstleistungen) haben durch Preis- und Einkommensänderungen negative Auswirkungen auf die Konsummöglichkeiten. Konsumverluste durch Strukturwandel sind ungefähr doppelt so groß wie die durch Klimapolitik verursachten.
- 2) Entwicklungseffekt: Die Studienergebnisse zeigen, dass Klimapolitik die Wettbewerbsfähigkeit der Sektoren der Indischen Volkswirtschaft unterschiedlich beeinflusst und tendenziell den Strukturwandel bremst.
- 3) Verteilungseffekte: Sowohl Klimapolitik als auch Strukturwandel wirken regressiv. Konsummöglichkeiten ärmerer Haushalte sind in beiden Fällen stärker beeinträchtigt. Dieser Effekt ist aber beim Strukturwandel wesentlich stärker ausgeprägt. Die Spanne der Konsumänderungen zwischen armen und reichen Haushalten ist mehr als doppelt so groß wie bei der Klimapolitik. Während arme Haushalte in einigen Szenarien mehr als 15% an Einkommen durch den Strukturwandel verlieren, erhöht sich das Einkommen reicher Haushalte um 5%. Ein wesentlicher Grund dafür ist der hohe Beschäftigungsanteil armer Haushalte im Agrarsektor, in welchem im Szenario mit Strukturwandel geringere Einkommen erzielt werden.
- 4) Die Ergebnisse sind robust über verschiedene sozio-ökonomische Szenarien (SSPs).

Die Studie schlussfolgert, dass eine sozial ausgewogene, den Strukturwandel begleitende und die Förderung armer Haushalte beinhaltende Politik wichtiger ist als eine Reduzierung klimapolitischer Ziele. Wenn Politikmaßnahmen richtig kombiniert werden, stellen die Unterstützung armer Haushalte und der Klimaschutz übereinstimmende Ziele dar. So könnten Maßnahmen zur Rückverteilung von CO₂-Steuereinnahmen neben den nachteiligen Effekten von Klimapolitik auch diejenigen von Strukturwandel berücksichtigen. Staatliche Industriepolitik sollte ärmere Haushalte unterstützen, in den Industrie- oder Sektorservice zu wechseln. Die Studie wurde auf dem Internationalen Energy Workshop vorgestellt und für eine Veröffentlichung eingereicht (Leimbach u.a., 2022b).

II.1.13 Arbeitspaket 4.5: Maßnahmen zur Vermeidung negativer Verteilungseffekte (IfW, all)

In Zusammenarbeit mit PIK-Kollegen aus anderen Projekten wurde eine Studie erstellt, in der eine spezielle Form der Klimafinanzierung analysiert wurde (Soergel u.a. 2021). Sie beinhaltet die Rückverteilung von Einnahmen aus der Kohlenstoffbepreisung zur Minderung von Armut und zeigt wie eine pro-Kopf Umverteilung dieser Einnahmen den Anstieg von Menschen, die unter die Armutsgrenze fallen (betrifft vor allem Sub-Sahara Afrika), drastisch reduzieren kann.

Aus den Politiksimulationsstudien der Justus-Liebig-Universität Gießen in Arbeitspaket 4.2 ergab sich, dass sowohl Klimapolitik zur CO₂-Reduktion in Deutschland (Europa) als auch die geplante CO₂-Bepreisung von Importen in die EU unterschiedliche Auswirkungen auf verschiedene Einkommensklassen deutscher Haushalte haben. Landbesitzer profitieren von der Klimapolitik aufgrund der

stärkeren Nachfrage nach Land für erneuerbare Energien. Klimapolitik führt zu geringeren Einkommen aus Kapital und Arbeit, was jedoch hauptsächlich reichere Haushalte betrifft. Ärmere Haushalte können summa summarum von der Klimapolitik profitieren, sofern die Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung nach einem Pro-Kopf-Schlüssel an die Haushalte weitergegeben werden. Dies bedeutet, eine „gerechte“ Verteilung der Einnahmen aus der CO₂-Bepreisung kann bereits als sozialkonformes Politikinstrument dienen. Gleichzeitig bestätigen unsere Simulationen, dass besonders ärmere Haushalte unter steigenden (Energie-)Preisen leiden. In Anbetracht der aktuellen Energiekrise erscheinen daher sozialkonforme flankierende Politikmaßnahmen zur Unterstützung ärmere Haushalte sinnvoll.

Des Weiteren führt die CO₂-Bepreisung von Importen in die EU einerseits zu faireren Wettbewerbsbedingungen für Unternehmen in der EU, andererseits auch zu Nachteilen für Produzenten in Entwicklungsländern. Hierbei handelt es sich u. a. um einkommensschwache Kleinbauern und Kleinunternehmer. Daher sollte die CO₂-Bepreisung an der EU-Grenze durch sozialkonforme entwicklungspolitische Unterstützung für einkommensschwache Kleinbauern und Kleinunternehmer flankiert werden. Dies gilt umso mehr angesichts der drohenden massiven Nachteile durch den Klimawandel für Menschen in Entwicklungsländern.

Negative Verteilungseffekte, die vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländer auftreten würden (Arbeitspaket 2.2), können durch den Abbau von Handelsbarrieren in der langen Frist vermieden werden. Durch Handelsliberalisierung verlagert sich die einheimische Produktion auf exportstarke Wirtschaftszweige (Mahlkow 2022b). Verteilungseffekte von Handelsliberalisierung sind komplex und können sich von Land zu Land unterscheiden. Damit der handelsinduzierte Strukturwandel keine negativen Verteilungseffekte verursacht, müssen langfristige Politikmaßnahmen ergriffen werden, die den Wechsel von Arbeitskräften in die exportstarken Sektoren vereinfacht. Politikmaßnahmen sind z.B. Weiterbildungsmaßnahmen, Arbeitsmarktregulierungen, Arbeitslosenversicherungen und Industriepolitik, die Schlüsselindustrien darin fördern sich an den ausländischen Wettbewerb und den Klimawandel anzupassen.

Im Rahmen der Abschlusskonferenz und dem Rochade-Abschlussworkshop an der Wirtschaftsuniversität Wien wurden klimapolitische Verteilungskonflikte und Politikmaßnahmen zu ihrer Lösung mit Vertretern/innen aus Politik und Wissenschaft diskutiert.

II.1.14 Referenzen

Die im Teil I und Teil II.1 verwendeten externen wissenschaftlichen Referenzen werden im Folgenden aufgeführt. Die im Rahmen des Projektes entstandenen Arbeiten finden sich im Abschnitt II.6.

Aguiar, A., M. Chepeliev, E. L. Corong, R. McDougall, and D. Van Der Mensbrugge (2019). The gap data base: version 10. *Journal of Global Economic Analysis* 4 (1), 1–27.

Baumstark L, Bauer N, Benke F, et al (2021) REMIND2.1: Transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits. *Geoscientific Model Development*

- Caliendo L., Parro F. (2015). Estimation of the trade and welfare effects of NAFTA. *The Review of Economic Studies* 82(1):1–44.
- Crespo N., Fontoura M.P. (2007). Integration of CEECs into EU market: Structural change and convergence. *Journal of Common Market Studies* 45(3):611–632.
- Chowdhry, S., J. Hinz, K. Kamin und J. Wanner (2022). Brothers in arms: The value of coalitions in sanctions regimes. Robert Schuman Centre for Advanced Studies Research Paper (2022) 62.
- da Silva Freitas, L.F., de Santana Ribeiro, L.C., de Souza, K.B., & Hewings, G.J.D. The distributional effects of emissions taxation in Brazil and their implications for climate policy. *Energy Economics* 59, 37–44 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.07.021>.
- Discussions 2021:1–50. <https://doi.org/10.5194/gmd-2021-85>, URL <https://gmd.copernicus.org/preprints/gmd-2021-85/>
- Dorband, I.I., Jakob, M., Kalkuhl, M., & Steckel, J.C. Poverty and distributional effects of carbon pricing in low- and middle-income countries – A global comparative analysis. *World Development* 115, 246–257 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.11.015>.
- Eaton J., Kortum S. (2002). Technology, geography, and trade. *Econometrica* 70(5):1741–1779.
- Fischer, G., Nachtergaele, F.O., van Velthuizen, H.T., Chiozza, F., Franceschini, G., Henry, M., Muchoney, D. and Tramberend, S. 2021. Global Agro-Ecological Zones v4 – Model documentation
- Felbermayr, G., H. Mahlkow, and A. Sandkamp (2023). Cutting through the Value Chain: The Long-Run Effects of Decoupling the East from the West. Kiel Working Paper No. 2210.
- Herrendorf B., Rogerson R., Valentinyi Á. (2014). Growth and structural transformation. In: Aghion P., Durlauf S.N. (eds.). Chapter 6 of *Handbook of Economic Growth*, vol 2B. Elsevier, Amsterdam.
- Hübler M., Glas A. (2014). The energy-bias of North-South technology spillovers: a global, bilateral, bisectoral trade analysis. *Environmental and Resource Economics* 58(1):59–89.
- Hübler M., Hartje R. (2016). Are smartphones smart for economic development? *Economics Letters* 141:130–133.
- Hübler M. (2016). Does migration support technology diffusion in developing countries? *World Development* 83:148–162.
- Jakob, M., M. Haller, R. Marschinski (2012). Will History Repeat Itself? Economic Convergence and Convergence in Energy Use Patterns. *Energy Economics* 34 (1): 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2011.07.008>.
- Kutsch, J. und H. Mahlkow (2022) Regional effects of the India-UK free trade agreement. Kiel Working Paper, forthcoming.
- Leimbach, M., Bauer, N., Baumstark, L., Edenhofer, O. (2010), Mitigation costs in a globalized world: climate policy analysis with REMIND-R, *Environmental Modeling and Assessment* 15, 155-173.
- Luderer, G., Luderer, G., Madeddu, S., Merfort, L. et al. Impact of declining renewable energy costs on electrification in low-emission scenarios. *Nat Energy* 7, 32–42 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00937-z>
- McMillan, M., & Rodrik, D. Globalization, structural change and productivity growth. In *Making Globalization Socially Sustainable*, edited by Bachetta, M. & Jansen, M. (eds), 49–84. International Labor Organization, Geneva (2011).

- Melitz, M.J. (2003). The impact of trade on intra-industry reallocations and aggregate industry productivity. *Econometrica* 71 (6):1695–1725.
- Pothen F. Hübler M. (2018). The interaction of climate and trade policy. *European Economic Review* 107:1–26.
- Swiecki, T. (2017). Determinants of structural change. *Review of Economic Dynamics*. 24:95–131.
- Sörgel, B., Kriegler, E., Bodirsky, B. L., Bauer, N., Leimbach, M., Popp, A. (2020): Combining ambitious climate policies with efforts to eradicate poverty. *Nature Communications* 12, 2342.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-22315-9>
- Timmer M.P., Los B., Stehrer R., de Vries G.J. (2016). An anatomy of the global trade slowdown based on the WIOD 2016 release. GGDC research memorandum number 162, University of Groningen, The Netherlands.
- Timmer M.P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer R., de Vries G.J. (2015). An illustrated user guide to the World Input-Output Database: the case of global automotive production. *Rev Int Econ* 23:575–605.
- Uy T., Yi K.-M., Zhang J. (2013). Structural change in an open economy. *Journal of Monetary Economics* 60(6):667–682.
- van der Wijst, K.-I., F. Bosello, S. Dasgupta, L. Drouet, J. Emmerling, A. Hof, M. Leimbach, R. Parrado, F. Piontek, G. Standardi, D. van Vuuren (2022). New damage curves and multi-model analysis suggest lower optimal temperature. *Nature Climate Change* (forthcoming).

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind die Gehälter des wissenschaftlichen Personals sowie die damit einhergehenden Overheadpauschalen. Hinzu kommen die Gehälter studentischer Hilfskräfte. Reisegelder wurden für die Präsentation von Projektergebnissen auf internationalen Konferenzen, für Reisen zu Projekttreffen, Veranstaltungen im Rahmen des Klimadialogforums sowie zur Ausrichtung der Abschlusskonferenz in Wien genutzt. Das Reisebudget blieb dennoch teils ungenutzt da Veranstaltungen aufgrund der Pandemie virtuell stattfanden. Für die kostenneutrale Verlängerung wurden in Absprache mit dem Projektträger Mittel aus dem Budget für Reisekosten in das Budget für Personalkosten umgebucht. Weitere Gelder wurden für die Beschaffung von Software und Daten, für das professionelle Korrekturlesen unserer Forschungsartikel sowie für Einreichungsgebühren, die von wissenschaftlichen Fachzeitschriften erhoben werden, verwendet. Die genauen Positionen können den Verwendungsnachweisen entnommen werden.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

II.3.1 Teilprojekt A: PIK

Der Beitrag des PIK innerhalb des Projektes bestand zum einen darin, makroökonomische Szenarien zu erstellen, die hinsichtlich der Annahmen zu Klimapolitik und Strukturwandel variieren, und zum anderen

diese Szenarien in numerischen Simulationen zur Analyse von Transformationspfaden und Verteilungseffekten zu nutzen. Darüber hinaus war es die Aufgabe, im Zuge der Entwicklung und Anwendung eines multisektoralen Wachstumsmodells neue Erkenntnisse zur Wechselwirkung von Klimapolitik und Strukturwandel zu erlangen. Für die Berechnung von Klimapolitiksznarien konnten wir auf das bestehende Integrierte Bewertungsmodell REMIND zurückgreifen. Größere Anpassungsarbeiten und zusätzliche Forschung (verbunden mit einer Publikation) waren notwendig, um SSP-GDP-Szenarien zu aktualisieren und SSP-Strukturwandelszenarien zu generieren. Während die Analyse von Verteilungseffekten von Klimapolitik basierend auf REMIND durchgeführt werden konnte, wurden Verteilungseffekte von Strukturwandel im Rahmen einer teilprojektübergreifenden Fallstudie untersucht, die wesentlich von PIK koordiniert wurde. Darüber hinaus, hatte PIK darin die Aufgabe makroökonomische Variablen für die gewählten Szenarien (z.B. CO₂-Preis, Energiepreise, Wertschöpfungsanteile) an die Handelsmodelle weiterzuleiten.

II.3.2 Teilprojekt B: MCC

Das MCC hat auf drei verschiedene Art und Weisen methodisch zu dem Projekt beigetragen: 1. Robuste empirische Analysen, die teilweise kausale Aussagen zu den Konsequenzen von Klimapolitik auf Strukturwandel und Emissionen erlauben; 2. Entwicklung von detaillierten, mikroökonomisch fundierten Verteilungsanalysen, die genaue Aussagen über Verteilungswirkungen von Klimapolitik erlauben; 3. Analytische Modellierung, die ein konzeptionelles Verständnis von ökonomischen Wachstumsprozessen und Strukturwandel erlauben. Für die gemeinsamen Arbeiten in AP 4 konnte das Projekt insgesamt auf das am MCC etablierte, länderspezifische Wissen zu Indien aufbauen, das teilweise durch eigene Feldforschung (siehe z.B. Montrone u.a., 2021) aufgebaut worden ist. Das MCC hat zudem umfangreiche Erfahrung in der Bestimmung von Verteilungseffekten mithilfe von Mikrosimulationen, die auch vermehrt in die Beratung von politischen Entscheidungsträgern eingehen. Darauf aufbauend konnten dann spezifische Methoden entwickelt werden, die es erlauben, Modellergebnisse auf konkrete Verteilungseffekte herunter zu brechen.

In unseren Kernarbeitspaketen, AP 1.1. und 1.2. konnten wir moderne empirischen Methoden (z.B. stacked difference and difference) beisteuern und damit einen ökonometrischen robusten Beitrag zu der Frage liefern, wie Strukturwandel, Armutsbekämpfung und Karbonisierungsprozesse aufeinander aufbauen. Das Erstellen eines globalen Paneldatensatzes von regional und sektoral disaggregierten BIP Daten seit 1960 und Zusammenbringen mit Kraftwerksdaten war sehr ressourcenintensiv.

II.3.3 Teilprojekt C: Justus-Liebig-Universität Gießen

Während der makroökonomischen Arbeiten in Arbeitspaket 1.3 (siehe Punkt 1) konnten wir auf solide Erfahrung aus ähnlichen Analysen mit ähnlichen Datensätzen zurückgreifen. So konnten wir mit angemessenem Aufwand eine Publikation im Journal der Vereinigung der Europäischen Umwelt- und Ressourcenökonomien erzielen, die einen neuen Modellansatz und neue Erkenntnisse über sektorübergreifenden Strukturwandel in einer globalisierten Welt bietet. Somit adressiert sie das Kernthema des Rochadeprojekts und ist für das Rochade-Projekt, die Forschungs-Community und die strukturelle Abschätzung internationaler Auswirkungen von nationalen Handels- und Klimapolitiken bedeutsam. In unserer zusätzlichen mikroökonomischen Analyse (siehe Punkt 1) konnten wir

ebenfalls auf bestehende Expertise und Daten zurückgreifen und somit mit angemessenem Aufwand einen neuen Modellansatz und neue Erkenntnisse gewinnen.

Unsere Kernforschungsarbeit des Arbeitspaketes 4.2 stellt einen wichtigen Beitrag zum Rochade-Projekt dar, indem es deutsche Klimapolitik im europäischen Klimapolitikkontext untersucht. Durch den Fokus auf Deutschland ergibt sich ein Alleinstellungsmerkmal unseres Teilprojekts innerhalb des Rochade-Projektverbundes. Die geschätzten Verteilungseffekte von Klimapolitik in Deutschland sind für deutsche Ministerien und Entscheider sowie für Arbeitspaket 4.5 besonders relevant. Um diese Modellrechnungen durchführen zu können, war es zunächst nötig, aktuelle Makrodaten der Weltwirtschaft sowie Mikrodaten deutscher Haushalte zu erwerben (siehe Punkt 2). Innerhalb der diversen Teilarbeitsschritte bearbeiteten verschiedene Projektmitarbeiter jeweils einen bestimmten Datensatz bzw. Kalkulationsschritt. Außerdem wurden Szenarienrechnungen mit dem Schwerpunkt Indien für das gemeinsame Arbeitspaket 4.4 benötigt. Aufgrund der Vielfalt und Komplexität der Datenbearbeitungs-, Programmier- und Analyseaufgaben war ein entsprechender Personaleinsatz notwendig. Gleichzeitig konnten wir wiederum auf einen soliden Erfahrungsschatz, bestehende Modellierungsarbeiten sowie nationale und internationale Forschungsnetzwerke zurückgreifen und dadurch mehrere Publikationen in etablierten Fachzeitschriften erzielen.

Am Ende des Projekts blieb ein Teil der für Teilprojekt C bewilligten Mittel übrig.

II.3.4 Teilprojekt D: Kiel Institut für Weltwirtschaft

Unsere Kernforschungsarbeit (Arbeitspaket 2.1 und 2.2) ist ein wichtiger Beitrag zum Rochade-Projekt. Hierfür haben wir ein komplexes Handelsmodell entwickelt (KITE) und es soweit angepasst, dass sich hiermit die Auswirkungen des Klimawandels auf den länderspezifischen Strukturwandel berechnen lassen. Aus diesen Arbeitspaketen entstanden zwei Forschungspapiere, die bis zum Ende des Jahres (2022) fertiggestellt und in einem wissenschaftlichen Fachjournal und bei einer Fachkonferenz zur Begutachtung eingereicht werden.

In KITE implementierten wir ein CO₂-Accounting entlang der globalen, sektorübergreifenden Wertschöpfungskette, um anschließend einen CO₂-Preis einzuführen, der sich je Land unterscheiden kann. Diese Erweiterung war nicht nur Grundlage für das projektübergreifende Forschungspapier, welches aus Arbeitspaket 4.4 entstanden ist, sondern auch für evidenzbasierte Politikberatung am IfW. So wurde in einer Policy-Studie mit KITE die Auswirkung eines Klimaklubs und eines CO₂-Grenzausgleiches untersucht.

Die Entwicklung von KITE und die Aufbereitung der genutzten Datenquelle GTAP war hinlänglich komplex und benötigte einen entsprechenden Personaleinsatz. Wir konnten aber auf einen soliden Erfahrungsschatz, sowie Synergien mit anderen Arbeitsgruppen am IfW und auf ein internationales Forschungsnetzwerke zurückgreifen, um die Aufgabe zufriedenstellend zu bewältigen. Mit KITE haben wir ein Tool entwickelt, welches auf Jahre hin für erstklassige Forschung und Politikberatung genutzt werden kann.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse des entstandenen Wissens

Ein Hauptschwerpunkt der Projektarbeit war die Präsentation der Forschungsergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen sowie die Veröffentlichung der Forschungsergebnisse in Fachzeitschriften (Abschnitt 6 enthält eine Auflistung aller im Projekt entstanden Veröffentlichungen). Wir tragen somit zur Wissens- und Meinungsbildung in der Forschungs-Community bei und bieten eine Informationsgrundlage für Politiker und Entscheider. Unsere diversen Modellentwicklungen sollen der Forschungs-Community für weitere Forschungsarbeiten zugutekommen. Neben den betreffenden Forschungsartikeln stellen wir daher Modellcodes und frei verfügbare Daten zur Verfügung.

Um unsere Projektergebnisse bekanntzumachen und um an der öffentlichen Debatte (z.B. im Rahmen des Dialogs zur Klimaökonomie) teilzuhaben, besuchten wir zahlreiche Veranstaltungen und präsentierten/diskutierten unsere Ergebnisse. Während der gesamten Projektlaufzeit nahmen wir in Präsenz oder online an dem BMBF-Dialog zur Klimaökonomie teil, insbesondere an der Start- und Abschlusskonferenz in Berlin, an den BMBF-Klimaforen (z. B. Transparente Klimabilanzen, Ausstieg aus fossilen Energieträgern – Wie gelingt eine faire Systemtransformation, Increasing Global Climate Ambition, Der Finanzsektor als Klimaschützer? Das Potenzial von Sustainable Finance), ausgewählten Treffen der Virtuellen Roundtable Series, dem energiepolitischen Workshop (Erwartungen an die klimapolitischen Folgen des Regierungswechsels in den USA), der FONA-Konferenz (Mit grünen Innovationen in die Zukunft) und dem COP26-Side Event (Sustainable Finance for Climate Mitigation). Des Weiteren nahmen wir an dem BMBF TSP-1-Fachworkshop in Berlin sowie (online) an der zugehörigen Vorbesprechung mit dem Schwerpunkt Kohleausstieg in Deutschland teil. In dem 2022 (online) stattgefundenen TSP-1-Abschluss-Fachworkshop präsentierte die Justus-Liebig-Universität Gießen die Ergebnisse des gesamten Rochade-Projekts.

Die Abschlusskonferenz des Projektes wurde als öffentliche Veranstaltung an der Wirtschaftsuniversität Wien durchgeführt. Neben den Vorträgen von internationalen Forschern sorgte insbesondere eine hochkarätig besetzte Podiumsdiskussion mit Frau Gewessler, der österreichischen Bundesministerien für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, dem PIK-Direktor, Herrn Edenhofer und dem Direktor des WIFO, Herrn Felbermayr, für große öffentliche Aufmerksamkeit. (https://www.wifo.ac.at/news/news_detail?j-cc-id=1653000676991&j-cc-node=news).

II.4.1 Teilprojekt A: PIK

Die Arbeiten des ROCHADE-Projekt liefern einen wesentlichen Beitrag zur Erstellung neuer Szenarien. Zwei Arten von Szenarien wurden erstellt – Strukturwandelszenarien (Leimbach u.a., 2022a) und GDP-Szenarien (Koch und Leimbach, 2022). Beide korrespondieren mit dem in der wissenschaftlichen Gemeinschaft („climate and sustainability community“) vorherrschenden Szenarioformat - den „Shared Socio-Economic Pathways“ (SSP) und liegen auf Länderebene bis 2050 bzw. 2100 für alle fünf SSPs vor. Die Strukturwandelszenarien sind eine Erweiterung bisheriger Szenarien, die GDP-Szenarien eine

Aktualisierung. Die Strukturwandelszenarien sind für die Indien-Fallstudie des ROCHADE-Projektes genutzt worden, die GDP-Szenarien in den Projekten NAVIGATE (<https://www.navigate-h2020.eu/>) und SHAPE (<https://shape-project.org/>). Im NAVIGATOR (<https://www.navigate-h2020.eu/navigator/apply>) stehen die Szenarien der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zur Nutzung zur Verfügung. Die GDP-Szenarien erlauben unter anderem die Analyse von Effekten pandemiebedingter ökonomischer Rückgänge in Klimaschutz- und Klimaimpaktsszenarien. Die Verwendung der Strukturwandelszenarien ermöglicht z.B., besser die Beeinträchtigung von Entwicklungspotentialen durch Klimawandel in Ländern mit hohem Anteil ökonomischer Aktivität im Agrarsektor abzuschätzen.

Die im Projekt erarbeitete gemeinsame und vom PIK geleitete Studie zu den Verteilungseffekten von Strukturwandel und Klimapolitik in Indien ist die erste ihrer Art (Leimbach u.a., 2022b). Die in dieser Studie getätigten Schlussfolgerungen geben eine erste Orientierung für klima-, sozial- und industriepolitische Politikmaßnahmen. Es kann erwartet werden, dass die Rezeption der in einem hochrangigen wissenschaftlichen Journal eingereichten Studie eine Diskussion darüber anregt, wie die politik-relevanten Ergebnisse in politische Handlungsempfehlungen umgesetzt werden können. Gleichzeitig werden weitere wissenschaftliche Arbeiten initiiert werden, die der Validierung der Erkenntnisse dienen. Einige diesbezügliche Punkte des zukünftigen Forschungsbedarfs sind in der Studie genannt.

Das im ROCHADE-Projekt entwickelte multisektorale Wachstumsmodell ist ein Versuch, Vorteile verschiedener Modellierungsansätze zu kombinieren: (i) Kompaktheit, Transparenz und numerische Effizienz von konzeptionellen Modellen, (ii) empirische Fundierung und Sektorinteraktion von CGE-Modellen, (iii) intertemporale Dynamik von Wachstumsmodellen, (iv) Energiesystem- und Klimaimpaktrepräsentation von IAM-Modellen. Das Modell liegt in einer Version vor, die erste Antworten auf die Frage geben kann, ob Klimawandel und Klimapolitik Strukturwandel und damit ökonomische Entwicklung befördern oder bremsen. Das Modell kann genutzt und erweitert werden, um weitere Forschungsfragen anzugehen, z.B. die Untersuchung von sektoralen Impaktkanälen, zu Energiepreis-Schockanalysen oder zum Einsatz von Klimapolitikinstrumenten unter den Bedingungen imperfekter Kapital- und Arbeitsmärkte. Darüber hinaus bildet das multisektorale Wachstumsmodell einen makroökonomischen Kern, der in Kopplung mit dem REMIND-Energiesystem und dem MAgPIE-Landnutzungssystem zur Herausbildung einer neuen Stufe prozessbasierter IAMs führen könnte.

II.4.2 Teilprojekt B: MCC

Die empirischen Arbeiten haben maßgeblich zum Verständnis beigetragen, warum manche Länder weiterhin fossile Infrastruktur aufbauen – diese Ergebnisse können bereits in internationale Bemühungen einfließen, die helfen, die Investitionen in fossile Brennstoffe wie Kohle umzuleiten. Die Ergebnisse suggerieren, dass das Überspringen einer fossilen Infrastruktur für Entwicklungs- und Schwellenländer v.a. mit zusätzlicher Förderung von Infrastruktur einhergehen muss, um auch politökonomische Vorbehalte auszuräumen. Während des Projekts konnte das MCC diese Ergebnisse bereits z.B. im Rahmen der Power Past Coal Alliance und auf einem Side Event der COP26 (Glasgow) einbringen. Aktuell helfen sie bei den Beratungen der Bundesregierung in Hinblick auf eine effektive Klimaaußenpolitikstrategie. Aktuell fließen sie auch in Diskussionen mit indischen und indonesischen

Stakeholdern ein. Das MCC berät z.B. die indonesische Regierung bei der Einführung eines CO₂ Preises, wobei die Effekte auf Industrie, arme Bevölkerungsgruppen und die Kohleindustrie von herausragender Bedeutung sind. Auch deutsche Akteure der Entwicklungszusammenarbeit werden vom MCC in diese Richtung beraten.

Die Verteilungsanalysen, die das MCC v.a. zu Arbeitspaket 4 beigetragen haben erlauben eine starke Disaggregation von Modellergebnissen und eine entsprechende politökonomische Bewertung von Politikpfaden. Mit Teilen der Ergebnisse werden wir in zukünftigen wissenschaftlichen Projekten (z.B. im Rahmen des von der EU geförderten ELEVATE Projekts) weiterarbeiten und diese verallgemeinern, bzw. die entsprechende Modellinfrastruktur verfeinern. Idealerweise können so die nun für Indien vorliegenden Ergebnisse auch für ein breiteres Länderspektrum repliziert werden.

Die Ergebnisse helfen auch die Herausforderungen und Lösungsmöglichkeiten von Klimaschutz in Schwellen- und Entwicklungsländern in der Öffentlichkeit besser zu kommunizieren. Jan Steckel konnte so z.B. bei Planet Wissen (Weltweiter Handel – Immer alles verfügbar trotz Pandemie und Klimakrise?, 10.12.2021) zu den in ROCHADE beforschten Themen sprechen.

Wissenschaftlich haben die Arbeiten an ROCHADE zur Dissertation von Lorenzo Montrone (TU Berlin, Verteidigung der Arbeit am 27.1.2023) und Andri Brenner (Universität Potsdam, Juni 2022) beigetragen. Jan Steckel wurde zudem zum 1.12.2021 zum Professor für Klima- und Entwicklungsökonomik an der BTU Cottbus berufen.

II.4.3 Teilprojekt C: Justus-Liebig-Universität Gießen

Für die Ausgestaltung der derzeitigen deutschen Energie- und Klimapolitik sind besonders die betreffenden Ergebnisse zu Verteilungseffekten von Klimapolitik aus Arbeitspaket 4.2 relevant (Hübler u.a., 2022). Hierbei ergibt sich aus unseren Analysen der CO₂-Bepreisung an der EU-Außengrenze für die Spezifizierung einer solchen Politik auf EU-Ebene, dass der Ausgleich der Interessen von Entwicklungs- und Industrieländern, die als Exporteure bzw. Importeure agieren, ratsam ist. Während EU-Unternehmen von den resultierenden gleichförmigeren globalen Wettbewerbsbedingungen profitieren, können hingegen ärmere Farmer in Entwicklungsländern bzw. die betreffenden sich entwickelnden Volkswirtschaften darunter leiden.

Mit Hilfe der Unterstützung durch das BMBF konnten wir mehrere Artikel in renommierten internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschriften publizieren (Journal of Public Economics, Plos One, Environmental and Resource Economics, Energy Economics etc., siehe oben) bzw. im ersten Schritt als Konferenz-/Arbeitspapiere veröffentlichen.

Wir beteiligten uns aktiv an der Einbindung unserer Projekt-Stakeholder/Berater. So präsentierten wir im Rahmen unseres Stakeholder-Workshops in 2020 in Berlin langfristige sektorale Verteilungseffekte von Klimapolitik (Kohle- und Atomausstieg) in Deutschland. Außerdem wurde unsere Forschungsarbeit über Politiken zur Reduktion des Sandabbaus in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung online aufgegriffen (F.A.Z. online 2022). Wir hoffen, dass wir hierdurch der Forschungs-Community einen Impuls gegeben

haben, sich dieser von der ökonomischen Forschung bisher weitgehend ignorierten globalen Herausforderung stärker zu widmen.

Wir präsentierten Arbeiten aus den Arbeitspaketen 1.3 und 4.2, wie oben beschrieben, im Rahmen der internationalen Fachkonferenzen zur ökonomischen Modellierung und Ökonometrie (Economic Modelling, EcoMod) in Spanien und im Rahmen der Jahreskonferenz der kanadischen ökonomischen Vereinigung (Canadian Economics Association, CEA). Für die in 2020 (online) in Berlin stattgefundene jährliche Konferenz der europäischen Umwelt- und Ressourcenökonominnen (EAERE) begutachteten wir zahlreiche Konferenzbeiträge. In dem 2022 (online) stattgefundenen TSP-1-Abschluss-Fachworkshop präsentierten wir die Ergebnisse des gesamten Rochade-Projekts. Zu den Arbeitsmarkteffekten des Kohleausstiegs in der Lausitz betreuten wir eine Bachelor-Arbeit.

Die Bearbeitung der Disaggregation unseres Rechenbaren Allgemeinen Gleichgewichtsmodell (Hübler u.a., 2022) ergab für zukünftige Forschungsarbeiten folgende Datenerfordernisse, die insbesondere für Klimapolitikanalysen Deutschlands von besonderer Relevanz sind:

- Makroökonomische Daten zu Bundesländern oder Regionen innerhalb Deutschlands. Insbesondere lässt sich der interregionale Austausch von Gütern, Dienstleistungen und Elektrizität innerhalb Deutschlands derzeit nur schwer abschätzen. Hierzu haben wir ein Arbeitspapier veröffentlicht, welches den Status Quo der Verfügbarkeit regionaler Daten innerhalb Deutschlands auf Bundesländerebene darstellt (Braun & Keimes 2022). Dieses soll Modellierer, Datenanbieter wie statistische Institute, Forschungsförderer, Politiker und andere Entscheider über verfügbare und benötigte Daten informieren.
- Eigentum/Besitz von Land und Ressourcen und Erhalt daraus resultierender Renten/Erträge in verschiedenen Einkommensgruppen.
- Kapazitätsgrenzen des Ausbaus einzelner erneuerbarer Energien für Definitionen und Simulationen von Zukunftsszenarien.

II.4.4 Teilprojekt D: Kiel Institut für Weltwirtschaft

Für die Ausgestaltung der globalen Handelspolitik vor dem Hintergrund des zukünftigen Klimawandels sind besonders die betreffenden Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.2 relevant (Mahlkow 2022b). Hierbei ergibt sich aus unseren Analysen, dass die Effekte des Klimawandels auf das landwirtschaftliche Ertragsniveau global sehr heterogen sein werden. Selbst innerhalb einer Region (z.B. Europa) erfahren Länder „Schocks“ in ihren Produktivitäten mit umgekehrten Vorzeichen. Bleiben derzeitige Handelsmuster bestehen müssten allen voran Länder im globalen Süden, in denen der Klimawandel die landwirtschaftlichen Produktivitäten negativ beeinflussen wird, mehr Produktionsmittel in den Landwirtschaftssektoren aufwenden um die einheimische Nachfrage zu befriedigen. Diese Länder würden dann einen rückwärtsgewandten Strukturwandel erleben. Anstatt die Nachfrage durch eine nachlassende einheimische Produktion zu bedienen, könnten die Produkte aber auch importiert werden. Dazu müssten Handels- und Zollbarrieren abgebaut werden.

Eine vorrauschauende Liberalisierung der Handelspolitik unter multinationaler Schirmherrschaft bietet den Ländern im globalen Süden eine Chance sich vom rückwärtsgewandten Strukturwandel, ausgelöst durch den Klimawandel, zu lösen und stattdessen die Produktion in den Sektoren zu fördern in denen sie einen komparativen Produktionsvorteil haben. Deutschland kann bei dieser multinationalen Schirmherrschaft eine führende Rolle einnehmen. Für Deutschland bietet sich die Chance im Rahmen einer globalen Handelsliberalisierung Klimastandards und eine einheitliche CO₂-Bepreisung durchzusetzen.

Durch die Unterstützung des BMBF konnten wir mehrere Artikel für die Veröffentlichung in internationalen Fachzeitschriften vorbereiten. Integraler Bestandteil des Projekts war die Entwicklung des Handelsmodells KITE. Die Entwicklung von KITE führte unmittelbar zur drei Forschungspapieren, die mit Wissenschaftlern vom IfW, der Universität Bielefeld und der Universität Potsdam geschrieben wurden. Die Papiere befinden sich zurzeit im Peer-Review Prozess. Durch die Entwicklung von KITE haben sich vielfältige Synergieeffekte ergeben, die über die Analyse des Klima- und Strukturwandels hinausgehen. Seit Beginn des Überfalls Russlands auf die Ukraine wird KITE intensiv dazu eingesetzt die Auswirkungen verschiedener Sanktionsregime zu berechnen. Mit den Berechnungen hat das IfW verschiedene Bundesministerien und die EU-Kommission beraten.

Im Rahmen des Abschlussworkshops 2022 in Wien organisierten wir eine Konferenz an der WU Wien zu der wir neben internationalen WissenschaftlerInnen auch hochrangige PolitikerInnen und ministerial Beamte einluden. So nahm u.a. die österreichische Klimaschutzministerin Gewessler teil und diskutierte mit uns über unsere Projektergebnisse. Über unsere Forschungsergebnisse zu Klimaklubs und einem CO₂-Grenzausgleich wurde in der Zeitschrift DER SPIEGEL (2021)¹ berichtet. Wir hoffen, dass wir damit der Forschungsgemeinschaft einen Anstoß gegeben haben, dieser globalen Herausforderung mehr Aufmerksamkeit zu schenken.

Wir präsentierten Arbeiten aus den Arbeitspaketen 2.1 und 2.2 im Rahmen der vierzierten internationalen Fachkonferenzen 'International Economics' vom Kompetenzzentrum Forschungsschwerpunkt Internationale Wirtschaft (FIW) in Wien, der fünfundzwanzigsten Jahreskonferenz zur globalen ökonomischen Analyse (Global Economic Analysis) an der Purdue Universität, USA, und im Umweltökonomie Seminar der Universität von Kalifornien in Berkeley.

Die Analyse von Handelspolitik als Adaption an klimainduzierte Wohlfahrtsveränderungen (Mahlkow 2022a, 2022b) ergab für zukünftige Forschungsarbeiten einen Bedarf an verschiedenen Erweiterungen für Modelle, die auf der „neuen quantiativen Handelstheorie“ beruhen, um insbesondere globale Klimapolitikanalysen detaillierter durchführen zu können:

- Integration von verschiedenen Produktionsfaktoren, die durch den Klimawandel unmittelbar beeinflusst werden (Land) oder ihn verursachen (fossile Ressourcen). Hierfür werden makroökonomische Daten über diese Produktionsfaktoren auf Länderebene benötigt. Wenn

¹ „Willkommen im Klub“ DER SPIEGEL, 26 Juni 2021

man zusätzlich Daten über die Besitzverhältnisse dieser Faktoren hätte, kann man genauere verteilungspolitische Analysen von Klima- und Handelspolitiken durchführen.

- Beschleunigung der Berechnungszeit, um umfangreiche Sensitivitätsanalysen durchführen zu können. Hierdurch ist das Modellergebnis nicht mehr nur eine Punktschätzung, sondern es können Konfidenzintervalle angegeben werden. Diese Intervalle vermitteln ein genaueres Bild über die Unsicherheit eines Modellergebnisses.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Bis auf eine Veröffentlichung sind uns keine Studien bekannt, die neue Erkenntnisse zur Interaktion von Strukturwandel und Klimapolitik bzw. Klimawandel liefern. Die Studie von Lefevre u.a. (2022, "Global socio-economic and climate change mitigation scenarios through the lens of structural change" <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102510>) begreift und analysiert den ökonomischen Strukturwandel als ein Kernelement von Klimaschutzszenarien. Die Interaktion von Klimapolitik und Strukturwandel wird nur in einer Richtung untersucht (welchen Einfluss hat Klimaschutz auf Strukturwandel?). Die Studie wurde als Modellvergleichsstudie durchgeführt, was die Robustheit der erzielten Ergebnisse erhöht. Als wichtigstes Ergebnis betont die Studie, dass Klimapolitik nur einen geringeren Einfluss („second-order impact“) auf den Strukturwandel hat – ein Ergebnis, das mit den Ergebnissen des ROCHADE-Projekts übereinstimmt. Mit der Untersuchung von Verteilungseffekten aus Strukturwandel und Klimapolitik geht das ROCHADE-Projekt jedoch über Lefevre u.a. (2022) hinaus.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die folgende Liste führt alle Studien auf, die im Rahmen des ROCHADE-Projektes erarbeitet wurden.

II.6.1 Erfolgte bzw. eingereichte Veröffentlichungen

Balma, L., T. Heidland, S. Jävervall, H. Mahlkow, A. N. Mukasa und A. Woldemichael (2022). Long-Run Impacts of the Conflict in Ukraine on Food Security in Africa. Kiel Policy Brief, Ukraine Special 1.

[Download](#)

Brenner, A. (2021). The Social Power of Spillover Effects: Educating Against Environmental Externalities (CEPA Discussion Paper No. 35). Center for Economic Policy Analysis.

<https://doi.org/10.25932/publishup-51109>

Costa, D., Marcolino, M. (2022). "Structural Transformation and Labor Productivity in Brazil" Revista Brasileira de Economia (Brazilian Review of Economics).

F.A.Z. online (2022), 29. April, Oliver Becht: Aktueller UNEP-Bericht: Wie eine Sandkrise noch abgewendet werden kann. [Link](#)

Felbermayr, G., H. Mahlkow und A. Sandkamp (2023). Cutting through the Value Chain: The Long-Run Effects of Decoupling the East from the West. *Empirica*, forthcoming.

Fischer C., Hübler M., Schenker O. (2021). More birds than stones: A framework for second-best energy and climate policy adjustments. *Journal of Public Economics* 203:104515. [Download](#)

Hübler M., Bukin E., Yuting X. (2022a). The effects of international trade on structural change and CO₂ emissions. *Environmental and Resource Economics*, forthcoming. [Download](#)

- Hübler M. & Schwerhoff G. (2022). Climate change, economic policy and technology choice of heterogeneous producers. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, conditional accepted. Rochade-Website: [Download](#)
- Hübler, M., Wiese M., Braun M., Damster J. (2022). The distributional effects of CO₂ pricing at home and at the border on German income groups. Working paper, Rochade website. [Download](#)
- Hübler M., Pothen F. (2021). Can smart policies solve the sand mining problem? PLOS ONE 16(4): e0248882. [Download](#)
- Kalkuhl, M., Steckel, J. C., Montrone, L., Jakob, M., Peters, J., & Edenhofer, O. (2019). Successful coal phase-out requires new models of development. Nature Energy, 4(11), 897-900.
- Koch, J, Leimbach, M., "Economic growth projections: major changes of key drivers in environmental assessment studies" Ecological Economics (under review).
- Kriegler E., Gulde R. u.a. (2020). Phasing out Fossil Fuels - How to Achieve a Just Transition? Background paper for the BMBF Forum Climate Economics 7. [Download \(English\)](#), [Download \(German\)](#)
- Leimbach, M., Bauer, N. (2021). Capital markets and the costs of climate policies. Environmental Economics and Policy Studies. DOI : 10.1007/s10018-021-00327-5
- Leimbach, M., Giannousakis, A. (2019), Burden Sharing of Climate Change Mitigation: Global and Regional Challenges under Shared Socio-Economic Pathways. Climatic Change 155: 273-291.
- Marcolino, M. (2022a). "Accounting for Structural Transformation in the U.S." Journal of Macroeconomics. [Download](#).
- Leimbach, M., Marcolino, M., Koch, J. (2022a), „Structural change scenarios within the SSP framework“, FUTURES (under review). [Download](#)
- Leimbach M., Hübler M., Mahlkow H., Montrone L., Bukin E., Felbermayr G., Kalkuhl M., Koch J., Marcolino M., Pothen F., Steckel J. (2022b). Structural change is likely to increase inequality in India more than climate policy. EAERE conference paper. [Download](#)
- Mahlkow, H. und J. Wanner (2021). The Carbon Footprint of Global Trade Imbalances. Working Paper. [Download](#).
- Mahlkow, H, J. Wanner, G. Felbermayr und S. Peterson (2021). EU-Klimapolitik, Klimaclubs und CO₂-Grenzausgleich. Kurzstudie im Auftrag der Bertelsmann Stiftung. [Download](#).
- Montrone, L., Steckel, J. C., & Kalkuhl, M. (2022). The type of power capacity matters for economic development-Evidence from a global panel. Resource and Energy Economics, 101313.
- Montrone, L., Ohlendorf, N., & Chandra, R. (2021). The political economy of coal in India—Evidence from expert interviews. Energy for Sustainable Development, 61, 230-240.
- Ogenrwoth, B., Walusimbi R., Ssali P., Hübler M., Bonabana J. & Kyamanywa, S. (2022). The impact of climate change on food security in Uganda: A panel regression analysis. Conference paper.
- Ordonez, J., M. Jakob & J.C. Steckel (2022). Costs-and benefits of the Indian energy transition: A geographical analysis between federal states. Energy Policy.
- Podehl, L. (2022). Coal power plants and industrial development in India – A firm-level based analysis. Master Thesis. TU Berlin.
- Pothen F., Hübler M. (2021). A forward calibration method for analyzing energy policy in NewQuantitative Trade models. Energy Economics 100: 105352. [Download](#)

II.6.2 Geplante Veröffentlichungen

Braun M., Keimes N. (2022). Regional input-output tables for climate policy analysis: A brief data survey. Working paper, Rochade website. [Download](#)

Bühler D., Hübler M. (2022). Smartphones reveal social status: Does socio-economic equality enhance technological equality among smallholders? Work in progress.

Mahlkow, H. (2022a). The effect of trade policy on climate-induced structural change, *forthcoming*.

Mahlkow, H. (2022b). Trade policy and climate change adaptation: How it can be done. Kiel Working Paper, *forthcoming*.

Marcolino, M., Leimbach, M., Koch, J., (2022b). A Structural Transformation Integrated Assessment Model of Climate Change.

Missbach, L., J. Steckel, S. Kraus, S. Renner (in Vorbereitung). *Burning Coal, Flourishing Industries? Evidence from the Indonesian manufacturing sector*.

Ogenrwoth, B., Walusimbi R., Ssali P., Hübler M., Bonabana J. & Kyamanywa, S. (2022). The impact of climate change on food security in Uganda: A panel regression analysis. Conference paper.