



AUSTRIA
INSTITUT FÜR
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Wien, im Dezember 2024

ENDBERICHT

Anpassungen an den Klimawandel – Welche positiven
ökonomischen Effekte sind zu erwarten?

Studie im Auftrag
von Oecolution

ENDBERICHT

Anpassungen an den Klimawandel – Welche positiven ökonomischen Effekte sind zu erwarten?

Dezember 2024

Johannes Berger, Virág Bitto, Michael Gillesberger, Monika Köppl-Turyna und Ludwig Strohner
Studie im Auftrag von Oecolution

EXECUTIVE SUMMARY

Der Klimawandel stellt eine globale Herausforderung dar, mit erheblichen wirtschaftlichen Folgen sowohl auf kurzfristiger als auch langfristiger Ebene. Die öffentliche Diskussion konzentriert sich häufig auf Maßnahmen zur Emissionsreduktion, doch die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen wird immer deutlicher, um wirtschaftliche und soziale Schäden zu reduzieren. Diese Studie verfolgt das Ziel, die Potenziale von Anpassungsmaßnahmen im österreichischen Kontext zu bewerten.

Die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels sind vielschichtig und manifestieren sich sowohl direkt als auch indirekt. Direkte Effekte sind etwa Infrastrukturschäden durch Extremwetterereignisse, Produktivitätsverluste durch Hitzewellen und Ertragsrückgänge in der Landwirtschaft. Indirekt führen diese Ereignisse zu Störungen in globalen Lieferketten, erhöhtem Migrationsdruck und sozialen Kosten, etwa durch hitzebedingte Sterblichkeit. Empirische Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Österreich im Klimaszenario mit einer globalen Erwärmung von nicht mehr als 2 Grad bis 2050 jährliche Schäden von bis zu 10,8 Milliarden Euro zu erwarten hätte. Gleichzeitig weist die Literatur darauf hin, dass die Effekte nicht linear verlaufen: Mit jedem weiteren Grad an Erwärmung steigen die Kosten überproportional an.

Anpassungsmaßnahmen stellen eine effektive Möglichkeit dar, die negativen ökonomischen Folgen des Klimawandels zu mildern. Nach den Ergebnissen der Literatur finden Anpassungsmaßnahmen bereits jetzt in vielen Bereichen statt, wie etwa Anpassungen in der Land- und Forstwirtschaft, Investitionen in den Hochwasserschutz, der Installation von Frühwarnsystemen und klimaresistenterer Bauweise. Im Bereich der Patentanmeldungen ist die Entwicklung bei Klimavermeidung weiterhin dynamischer als bei Klimaanpassung, sodass hier ein Potenzial für Verbesserungen besteht. Modellgestützte Analysen für Österreich zeigen, dass ein Paket an Anpassungsmaßnahmen in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, Schutz vor Naturgefahren und Katastrophenmanagement die durch den Klimawandel verursachten Wertschöpfungsverluste um bis zu 70 Prozent reduzieren kann.

Die bestehende Literatur zur Anpassung an den Klimawandel fokussiert zumeist nur auf einzelne Teilbereiche und Maßnahmen, sodass ein umfassendes Bild derzeit fehlt. Häufig wird auf öffentliche Maßnahmen fokussiert, die ganz wesentlichen privaten Schritte, die in diesem Zusammenhang gesetzt werden, bleiben durchwegs unbeachtet. Ziel der Studie ist es, ein umfangreiches Bild der makroökonomischen Wirkungen von Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln, wobei der Einfluss auf Wertschöpfung, Arbeitsmarkt, Investitionen und Haushaltseinkommen ermittelt wird. Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse mit großen Unsicherheiten verbunden sind, hinsichtlich der Auswirkungen der Emissionen auf das Klima, der Folgen des Klimas auf die Wirtschaft und der Wirkungen der Anpassungen. Die Ergebnisse sind somit als Abschätzungen und Annäherungen zu verstehen.

Um die wirtschaftlichen Auswirkungen von Anpassungen an den Klimawandel für Österreich zu untersuchen, wird das Makromodell E-PuMA herangezogen. Das Modell ist eine Erweiterung des PuMA-Modells, welches die Bevölkerungsstruktur, den Unternehmensbereich, den Arbeitsmarkt und den öffentlichen Sektor detailliert abbildet. Auf Grundlage der empirischen Arbeit von Gourio und Fries (2020) über die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen in den USA und die prognostizierte Jahresdurchschnittstemperatur in Österreich werden in der Folge vier verschiedene Szenarien analysiert, nämlich jeweils die Ergebnisse in der „nahen Zukunft“ (2021-2050) bzw. in der „fernen Zukunft“ (2071-2100) für das RCP4.5- als auch für das RCP8.5-Szenario. Im RCP4.5-Szenario nimmt die Durchschnittstemperatur in Österreich im Zeitraum 2071 bis 2100 gegenüber 1971 bis 2000 um 2,3 Grad, im RCP8.5-Szenario um 4 Grad zu. Die positiven Effekte der Anpassungsmaßnahmen werden über mehrere Kanäle abgebildet, nämlich zum einen über eine geringere Abschreibung des Kapitalstocks (geringere Schäden) und damit geringerem Ersatzbedarf und zum anderen über eine höhere Produktivität (Raumklima zur Erhaltung der Produktivität und Produktinnovationen).

Die Ergebnisse zeigen, dass in der langen Frist und im Szenario mit der stärkeren Erwärmung aufgrund der Anpassungsmaßnahmen die realen Nettostundenlöhne um durchschnittlich 2,1 Prozent höher ausfallen können als ohne Anpassungsmaßnahmen. In den weniger stark betroffenen Szenarien (RCP4.5 und kurzfristige Szenarien) sind die Einkommenszuwächse moderater. Außerdem führen Anpassungsmaßnahmen zu einer erhöhten Beschäftigung. Die Beschäftigung ist im RCP8.5-Szenario in der fernen Zukunft um 0,6 Prozent höher, was etwa 26.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen entspricht. Die Arbeitslosenquote sinkt im Gegenzug um 0,3 Prozentpunkte, was rund 13.000 Arbeitslose weniger bedeutet. Die Modellsimulation zeigt, dass das reale BIP langfristig im RCP8.5-Szenario um 2,7 Prozent höher ausfällt, was einem jährlichen Wertschöpfungseffekt von knapp 13 Mrd. Euro (bezogen auf das BIP von 2023) entspricht. Der positive wirtschaftliche Einfluss spiegelt sich auch in den öffentlichen Finanzen wider, insbesondere über höhere Einnahmen aus Abgaben. Der Primärsaldo (Saldo ohne Zinszahlungen) verbessert sich langfristig im RCP8.5-Szenario um 0,7 Prozent des BIP im Vergleich zum Basisszenario ohne Anpassungsmaßnahmen. Dies entspricht einer Verbesserung von 3,5 Mrd. Euro bezogen

auf das BIP von 2023. In Szenarien mit weniger starkem Klimawandel sind die positiven Effekte der Anpassungsmaßnahmen geringer, da die Klimaschäden und somit auch der Anpassungsbedarf geringer sind.

Auf Grundlage der Ergebnisse formuliert die Studie konkrete Handlungsempfehlungen. Grundsätzlich sollte sich die öffentliche Hand auf bestimmte Aufgaben konzentrieren, wie das Setzen von Rahmenbedingungen, die Informationsbereitstellung, die Stärkung der Risikoprävention, die Bereitstellung von Infrastruktur oder die Sicherheit von kritischen Bereichen. Wichtig ist, Synergien zwischen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen zu nutzen und Rahmenbedingungen für die breite Etablierung von Klimarisikoversicherungen zu schaffen. Private Investitionen können etwa durch steuerliche Erleichterungen oder Zuschüsse gestärkt werden. Schließlich ist eine verstärkte Förderung von Forschung und Innovation notwendig, um neue Technologien zu entwickeln und die Effizienz bestehender Maßnahmen zu steigern. Die Zusammenarbeit zwischen öffentlichen und privaten Akteuren ist hierbei entscheidend, um eine breite Implementierung zu gewährleisten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Maßnahmen, die die Anpassung an den Klimawandel verstärken, effektiv sein können. Viele dieser Maßnahmen werden auf privater Ebene erfolgen und finanziert werden. Anpassungen gehen mit einer breiten Palette neuer Güter und Technologien einher. Damit die positiven Effekte dieser Anpassungen generiert werden können, müssen Innovationspotenziale genutzt werden und Unternehmen auf Veränderungen am Markt reagieren. Von besonderer Bedeutung wird zukünftig auch der Einsatz neuer Technologien zur Reduktion des Risikos sein. So ermöglicht der Einsatz von Satelliten, Drohnen und Internet der Dinge das Erheben einer großen Menge an Daten, die dann etwa mit Hilfe Künstlicher Intelligenz analysiert und somit zukünftige Entwicklungen abgeschätzt werden können.

Die öffentliche Hand soll im Rahmen dieses Prozesses unterstützend wirken. Österreich hat sich verpflichtet, Treibhausgasemissionen deutlich zu verringern. Dies erfordert auch öffentliche Mittel, um das Ziel zu erreichen. Angesichts knapper öffentlicher Mittel ist auf die Effizienz und Effektivität von Maßnahmen zu achten. Über die internationalen Verpflichtungen hinausgehende Ziele sollten angesichts des geringen Einflusses Österreich auf die globalen Emissionen vermieden werden. Entsprechend frei werdende Ressourcen sollten angesichts der hohen positiven Wertschöpfungseffekte für Anpassungsmaßnahmen eingesetzt werden.

INHALT

1. Hintergrund und Motivation	1
2. Literaturübersicht zu den ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels	3
2.1 Ökonomische Effekte auf die Wertschöpfung und BIP pro Kopf	4
2.2 Produktivität	7
2.3 Soziale Kosten von Kohlenstoff und Wohlfahrtsverlust	8
2.4 Konzentration auf bestimmte Sektoren und Länder	10
3. Klimawandelanpassung und ihre Auswirkungen	14
3.1 Modellbasierte Abschätzungen über Effekte der Anpassungsmaßnahmen	16
3.2 Ökonometrische Untersuchungen in relevanten Themenfeldern	26
4. Szenarienanalyse von Anpassungsmaßnahmen	32
4.1 Simulationsdesign	32
4.2 Ergebnisse der Simulationsszenarien	36
5. Handlungsempfehlungen	40

ABBILDUNGEN UND TABELLEN

Abbildung 1: Folgekosten durch klimawandelbedingte Schäden in Österreich lt. Steininger, 2050, in Mio. Euro __	11
Abbildung 2: Prozentuelle Veränderung der Wertschöpfung mit und ohne Anpassung im Verkehrssektor_____	19
Abbildung 3: Schematische Darstellung von E-PuMA _____	59
Tabelle 1: Überblick über Wertschöpfungseffekte in der Literatur _____	6
Tabelle 2: Nutzen-Kosten-Verhältnisse der in Tröltzsch et al. untersuchten Maßnahmen nach Relevanz und Zeitdimension _____	25
Tabelle 3: Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen in Gourio und Fries (2020) _____	34
Tabelle 4: Volkswirtschaftliche Auswirkungen von Anpassungen an den Klimawandel _____	38

1. HINTERGRUND UND MOTIVATION

Der Klimawandel ist eines der beherrschenden Themen unserer Zeit. Auf der Pariser Klimakonferenz 2015 einigten sich 195 Staaten auf das Ziel, die Erderwärmung auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Das Pariser Klimaschutzabkommen trat 2016 in Kraft. Die EU hat sich das Ziel gesetzt, ihre Emissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent (im Vergleich zum Emissionsniveau von 1990) zu reduzieren und bis 2050 klimaneutral zu werden. Das Fit-for-55-Paket ist dabei als Gesetzespaket zur Umsetzung der 55-Prozent-Reduktion ein wichtiger Baustein.

Die öffentliche Diskussion dreht sich zumeist darum, wie der Klimawandel zu verhindern bzw. einzudämmen ist. Es geht um die Umsetzung von Maßnahmen damit der Treibhausgasausstoß verringert wird. Weit weniger wird darüber diskutiert, mit welchen ökonomischen Auswirkungen durch den Klimawandel zu rechnen ist. Dies ist auch eine Folge davon, dass noch völlig offen ist, wie ambitioniert die Staatengemeinschaft in der Zukunft an die Reduktion der Treibhausgase herangehen wird und wie sich das Klima daher auf längere Frist ändern wird. Dementsprechend basieren Analysen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023) auf verschiedenen Szenarien hinsichtlich der weiteren Klimaerwärmung, die wiederum die Folgen des Klimawandels für die einzelnen Volkswirtschaften bestimmt.

Noch weniger wird thematisiert, inwiefern Anpassungsmaßnahmen die Auswirkungen des Klimawandels reduzieren. Mit fortschreitender Klimaerwärmung und höheren Schäden werden Unternehmen, die öffentliche Hand aber auch private Haushalte Schritte setzen, um die Folgen der Klimaerwärmung zu reduzieren und damit positive Auswirkungen auf die Wirtschaft auslösen. Dies reicht von Maßnahmen wie dem Ausbau des Hochwasserschutzes, baulichen Maßnahmen, der Installation von Frühwarnsystemen bis hin zur Installation von Klimaanlage. In der Literatur wird dieser Aspekt zwar untersucht, es wird aber zumeist auf einzelne Teilbereiche, wie den Verkehr, oder einzelne Wirtschaftssektoren abgestellt. Eine Gesamtschau ist aufgrund der umfassenden Anzahl an potenziellen Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen der Klimaerwärmung schwierig.

Ziel der Studie ist es, eine Abschätzung über mögliche wirtschaftliche Folgen von Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen und damit das positive Potenzial für die Volkswirtschaft abzuschätzen. Ausgangspunkt sind empirische Untersuchungen zu Adaptation, wobei die Folgen indirekt aus der wirtschaftlichen Entwicklung selbst geschlossen werden. Die empirisch basierte *new climate-economy* Literatur (Dell et al., 2014) entstand aus der Kritik an der Unsicherheit von *damage*-Funktionen in *integrated assessment* Modellen. Grundlage für diese Herangehensweise ist die Beobachtung, dass die Abhängigkeit der Wirtschaftsleistung von der Temperatur sehr unterschiedlich

ist und regional von der langfristigen Durchschnittstemperatur abhängt (siehe Gourio und Fries, 2020). Regionen, in denen die Durchschnittstemperatur hoch ist, sind von einer Hitzeperiode weniger beeinträchtigt als Regionen, in denen es im Schnitt deutlich kühler ist. Unter der Annahme eines optimalen Verhaltens lassen sich daraus auch die Anpassungskosten ableiten. Diese empirischen Ergebnisse werden in Kapitel 4 für eine makroökonomische Analyse für Österreich herangezogen. Auf Basis von E-PuMA lassen sich sowohl die Auswirkungen auf die Wertschöpfung, die Investitionstätigkeit und den privaten Konsum als auch die Folgen für den Arbeitsmarkt ermitteln.

Um einen Überblick zu geben, wird auch die vorhandene Literatur zu den Klimawandelfolgen und zu Anpassungsmaßnahmen aufgearbeitet. Dies bietet in einem ersten Schritt einen Überblick darüber, mit welchen wirtschaftlichen Effekten bzw. Wohlfahrtsverlusten im Rahmen des Klimawandels zu rechnen ist. Die Literatur über die Effekte von Anpassungen zeigt demgegenüber auf, welches Potenzial zur Schadensvermeidung besteht. Die Darstellung unterscheidet die bestehende Literatur in Analysen, die auf Modellberechnungen basieren, Analysen auf Grundlage von ökonometrischen Schätzungen und Kosten-Nutzen-Abschätzungen. Die Literatur zu den wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels ist in Kapitel 2 dargestellt, die Literatur zu den Anpassungsmaßnahmen ist in Kapitel 3 zu finden.

2. LITERATURÜBERSICHT ZU DEN ÖKONOMISCHEN AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS

Der Klimawandel hat weitreichende Auswirkungen auf das globale Wirtschaftssystem, zum einen durch langsame und langfristige Veränderungen des Klimas wie Durchschnittstemperaturen, Niederschläge, Trockenheit, Wüstenbildung und Anstieg des Meeresspiegels. Die Forschung hat den starken Zusammenhang zwischen Klimavariablen und wirtschaftlichen Ergebnissen nachgewiesen. Auf der anderen Seite geht der Klimawandel mit einem häufigeren Auftreten von so genannten „sudden onset events“ einher, das sind kurzfristige und plötzlich auftretende Wetterereignisse, die jedoch schwere Schäden verursachen können (wie Erdbeben, Überschwemmungen oder Gewitter). Diese Auswirkungen sind nicht gleichmäßig verteilt - Entwicklungsländer und wärmere Länder stehen aufgrund ihrer höheren Exposition und begrenzten Anpassungsfähigkeit vor ungleich größeren Herausforderungen.

Die Mechanismen, über die der Klimawandel die Wirtschaft beeinflusst, sind vielfältig. Zu den direkten Auswirkungen gehören Schäden an der Infrastruktur, geringere landwirtschaftliche Erträge und Produktivitätsverluste aufgrund von Gesundheitsproblemen. Indirekte Auswirkungen wie Störungen des Arbeitskräfteangebots und der Kapitalinvestitionen oder Konflikte und Migration (wie etwa Cattaneo-Peri, 2016; Abel et al., 2019) verschärfen diese Herausforderungen zusätzlich. Ökonometrische Studien wie die von Dell et al. (2012) unterstreichen die Unterscheidung zwischen Niveau- und Wachstumseffekten und betonen, dass der Klimawandel nicht nur das Produktionsniveau verschiebt, sondern auch die langfristige wirtschaftliche Entwicklung einschränken kann. Auch Burke et al. (2015) zeigen, dass Temperaturanstiege unabhängig vom Einkommensniveau der Länder nichtlineare Effekte auf die Produktion haben.

Um die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels umfassend zu beschreiben, zeigt die vorhandene Literatur eine Bandbreite methodischer Ansätze, die auf unterschiedlichen Ebenen und mit verschiedenen Zielen operieren. Zahlreiche Studien geben Einblicke in die Herausforderungen und Stärken der Modellierung und Bewertung dieser komplexen Zusammenhänge. Piontek et al. (2021) erstellen eine strukturierte Übersicht der verschiedenen Bewertungsmethoden, die die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels quantifizieren. Sie unterscheiden zwischen Bottom-up-Ansätzen, die sich auf spezifische Wirkungskanäle wie einzelne Sektoren oder Regionen konzentrieren und aggregiert werden, und Top-down-Ansätzen, die ökonometrische Methoden verwenden, um die Gesamtauswirkungen auf makroökonomischer Ebene zu modellieren.

Fortgeschrittene Methoden wie die Analyse von Paneldaten und integrierte Bewertungsmodelle (Integrated Assessment Models, IAM) haben entscheidend zur Quantifizierung dieser Effekte

beigetragen und die nuancierte Beziehung zwischen Klimavariabilität und Wirtschaftsleistung aufgezeigt. Piontek et al. (2021) bemängeln aber, dass aggregierte Schadensfunktionen in integrierten Bewertungsmodellen oft veraltete Annahmen über Anpassungsfähigkeiten beinhalten bzw. (Änderungen bei den) Anpassungsmaßnahmen nicht hinreichend berücksichtigen. Sie schlagen vor, empirische Beobachtungen stärker mit modellbasierten Ansätzen zu kombinieren, um präzisere Schätzungen zu ermöglichen.

Diese Literaturübersicht fasst zentrale Erkenntnisse der Forschung zusammen, mit einem Fokus auf den Auswirkungen auf Bruttoinlandsprodukt (BIP), Produktivität, soziale Kosten von Kohlenstoff, sektorspezifische Effekte und methodische Ansätze zur Bewertung der ökonomischen Schäden. Damit soll eine fundierte Grundlage geschaffen werden, um die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen, welche die dargestellten negativen Auswirkungen des Klimawandels begrenzen sollen, analysieren und einordnen zu können.

2.1 Ökonomische Effekte auf die Wertschöpfung und BIP pro Kopf

Kahn et al. (2021) führen eine länderübergreifende Analyse der langfristigen makroökonomischen Auswirkungen des Klimawandels durch. Die Studie verwendet ein Panel-Autoregressive Distributed Lag (ARDL)-Modell, um die Beziehung zwischen verschiedenen Klimaindikatoren (Temperatur- und Niederschlagsabweichungen) und dem Pro-Kopf-BIP-Wachstum im Zeitraum 1960-2014 zu analysieren. Auf dieser Grundlage nehmen die Autor:innen eine vorausschauende Szenarienanalyse vor, indem sie zukünftige Temperaturprognosen (RCP2.6 und RCP8.5)¹ in das Modell einfügen, um die potenziellen kumulativen Auswirkungen des Klimawandels auf das BIP bis 2100 zu schätzen. Das Modell dient somit sowohl zur retrospektiven Analyse der Vergangenheit als auch zur Prognose der ökonomischen Konsequenzen des Klimawandels unter verschiedenen Szenarien. Sie stellen fest, dass anhaltende Temperaturabweichungen - ob wärmer oder kühler als die historischen Durchschnittswerte - das Pro-Kopf-BIP-Wachstum in allen Einkommensgruppen von Ländern und Regionen verringern. Die Ergebnisse zeigen, dass ärmere Länder besonders anfällig sind, aber auch wohlhabendere Regionen betroffen sind. So schätzen die Autor:innen bei einem Szenario ohne Emissionsreduktionen (RCP8.5) einen Rückgang des Pro-Kopf BIP in der EU um 3,7 Prozent im Jahr 2050. Während Anpassungsmaßnahmen die klimabedingten Schäden begrenzen können, reichen sie laut der Modellanalyse nicht aus, um die negativen Effekten vollständig zu kompensieren.

¹ Der Begriff RCP – representative concentration pathway – wird zur Beschreibung von Szenarien der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre verwendet. Die Zahl beschreibt die kumulierte Gesamtmenge an Treibhausgasen in der Atmosphäre.

Watkiss und Watkiss (2021) bieten einen umfassenden Überblick über die wirtschaftlichen Kosten des Klimawandels in unterschiedlichen Regionen in Europa. Die Autor:innen kommen zu dem Ergebnis, dass das europäische BIP ohne angemessene Anpassungsmaßnahmen erheblich durch klimabedingte Schäden beeinträchtigt wird. Ein besonderes Augenmerk ihrer Analyse liegt auf Schäden, die durch Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen und Hitzewellen verursacht werden. Die Untersuchung zeigt eine erhebliche regionale Heterogenität in den wirtschaftlichen Auswirkungen, wobei die südlichen und südöstlichen Regionen Europas voraussichtlich überproportional hohe Kosten zu tragen haben werden. Diese Belastungen umfassen nicht nur wirtschaftliche Verluste, sondern auch hohe nicht-marktbezogene Auswirkungen, wie beispielsweise hitzebedingte Sterblichkeit und die damit verbundenen sozialen und gesundheitlichen Kosten. Bei einem Szenario mit moderaten Emissionsreduktionen (RCP4.5) prognostizieren die Autor:innen einen durchschnittlichen Rückgang des BIP in der EU um 2,5 Prozent im Jahr 2050, wobei Österreich etwas moderatere Effekte (2,2 Prozent) aufweist und Lettland (6 Prozent) am stärksten betroffen ist. Ein weiterer kritischer Faktor, den die Autor:innen hervorheben, sind mögliche Unterbrechungen in den Lieferketten, welche sich besonders stark auf exportorientierte Branchen auswirken und deren internationale Wettbewerbsfähigkeit gefährden.

Auch Garcia-León (2015) untersucht die Beziehung zwischen Klima und Wirtschaftsleistung in den wichtigsten europäischen Regionen auf NUTS-2-Ebene und analysiert Veränderungen des Pro-Kopf-BIPs im Zusammenhang mit Temperaturschwankungen. Ihre Ergebnisse weisen ebenso auf eine signifikante negative Beziehung zwischen steigenden Temperaturen und dem BIP hin, wobei die Querschnittsanalyse zu dem Ergebnis kommt, dass ein Temperaturanstieg um 1 °C mit einem durchschnittlichen Rückgang des BIP pro Kopf um 2,2 Prozent verbunden ist, wobei ärmere Regionen, für die ein Rückgang des BIP pro Kopf um 3,8 Prozent geschätzt wird, stärker betroffen sind. Was die langfristigen Wirtschaftswachstumspfade betrifft, so zeigt das Panelmodell stärker negative Auswirkungen auf das Wirtschaftswachstum in ärmeren Regionen, wobei ein Temperaturanstieg von 1 °C mit einer um 0,086 Prozentpunkte niedrigeren durchschnittlichen Wachstumsrate verbunden ist. Somit ist die Studie von Garcia-León ein Hinweis darauf, dass der Klimawandel die regionalen Einkommensunterschiede verschärfen kann. Der Autor untersucht auch die Kanäle, über die sich das Klima auf die Wirtschaft auswirkt. In der Querschnittsanalyse zeigt sich, dass die Industrie und der Dienstleistungssektor aufgrund niedrigerer Produktivität negativ vom Klimawandel beeinflusst werden. Für die landwirtschaftliche Produktion findet er divergierende Ergebnisse, während die Querschnittsanalyse sogar eine leicht positive Reaktion auf den Temperaturanstieg feststellt, zeigt die Panelanalyse leicht negative Effekte.

Tabelle 1: Überblick über Wertschöpfungseffekte in der Literatur

Autoren	Daten	Effekte	Methodik	Weitere Resultate
Kahn et al. (2021)	174 Länder 1960-2014	-3,7 % BIP pro Kopf bei Szenario ohne Emissionsreduktionen (RCP 8.5) in der EU bis 2050	Panel-Autoregressive Distributed Lag (ARDL)-Modell	Historisch führte eine 0,01° C Temperaturabweichung zu -0,05 % im BIP pro Kopf, ärmere Länder sind aufgrund begrenzter Anpassungskapazitäten besonders anfällig.
Watkiss & Watkiss (2021)	EU-Länder Simulationsdaten aus Klimamodellen	-2,5 % BIP bei Szenario mit moderatem Emissionsrückgang (RCP 4.5) bis 2050	Intertemporal Computable Equilibrium System	Verluste resultieren v.a. aus Meeresspiegelanstieg, Überschwemmungen und geringeren Ernteerträgen. In Südeuropa sind Arbeitsproduktivität und Energieversorgung stark betroffen, Fischerei und Forstwirtschaft zeigen meist moderate Effekte.
García-León (2015)	DE, FR, UK, IT, SP (NUTS-2-Ebene) 1990-2021	-2,2 % BIP pro Kopf bei +1 °C Temperatur	Ricardianische Regressionsanalyse auf multiregionaler Ebene	Rückgang von Pro-Kopf-BIP um 3,8 % in ärmeren Regionen und negative Auswirkungen auf langfristiges Wachstum, insbesondere im Industrie- und Dienstleistungssektor.
Kalkuhl & Wenz (2020)	77 Länder 1985-2014	-3,5 % Bruttoregionalprodukt in bereits warmen Regionen bei +1 °C Temperatur	Ramsey-Wachstumsmodell	Verluste sind in arbeitsintensiven Sektoren besonders ausgeprägt, wobei neben den kurzfristigen Produktivitätsverluste keine nachweisbaren Einflüsse auf langfristige Produktivitätswachstumsraten identifiziert werden.
Bilal & Känzig (2024)	173 Länder 1900-2020	-12 % weltweites BIP bei +1 °C der globalen Temperatur	Time-series local projection approach	Haupttreiber der negativen BIP-Effekte sind Produktivitätsrückgänge um 2,5 % und ein Anstieg der Kapitalabschreibungsrate um 0,3 PP.

Erstellt mit Datawrapper

ECO AUSTRIA
INSTITUT FÜR
WIRTSCHAFTSRECHNUNG

García-León et al. (2021) untersuchen, wie sich extreme Hitzeereignisse über eine geringere Arbeitsproduktivität auf die Wirtschaftsleistung in Europa auswirken, wobei sie sich auf die südlichen Regionen konzentrieren, in denen die Temperaturen im Allgemeinen höher sind. Die Studie nutzt ein regionales Wirtschaftsmodell in Kombination mit Hitzestressindizes, um die wirtschaftlichen Auswirkungen von Hitzewellen zu quantifizieren. García-León et al. stellen fest, dass die südeuropäischen Länder aufgrund häufiger Hitzewellen Produktivitätsverluste und damit BIP-Einbußen von mehr als 1 Prozent hinnehmen müssen. Während die direkten Auswirkungen der Hitze auf die Arbeitsproduktivität in erster Linie in Sektoren, in denen viel Arbeit im Freien verrichtet wird, zu spüren sind, breiten sich diese Verluste über die Lieferketten in der gesamten Wirtschaft aus. So sind beispielsweise Dienstleistungssektoren, die auf landwirtschaftliche oder industrielle Produkte angewiesen sind, indirekt von Hitzewellen betroffen, die die Produktion in diesen Sektoren verringern. Umgekehrt kann der internationale Handel mit weniger von Hitzeperioden betroffenen Regionen die negativen Auswirkungen dämpfen. Ohne weitere Anpassungsmaßnahmen werden sich die hitzebedingten BIP-Verluste bis 2060 in einem Szenario mit hohen Emissionen (RCP8.5) laut ihren Berechnungen fast verfünffachen. Die Autor:innen betonen die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen, wie verbesserte Arbeitsbedingungen und Hitzeschutz, um die Produktivitätsauswirkungen des Klimawandels in gefährdeten Regionen zu begrenzen.

Studien wie die von Kalkuhl und Wenz (2020) und Bilal und Känzig (2024) untersuchen die globalen makroökonomischen Auswirkungen von Temperaturanstiegen. Erstere analysieren die wirtschaftlichen Auswirkungen von Temperaturänderungen auf subnationaler Ebene in 77 Ländern. Sie ermitteln, dass

ein Temperaturanstieg um 1 °C in bereits warmen Regionen das Brutto regionalprodukt (BRP) um etwa 3,5 Prozent verringert, wobei die Verluste in arbeitsintensiven Sektoren besonders ausgeprägt sind. Kalkuhl und Wenz untersuchen dabei sowohl Niveaueffekte als auch Auswirkungen auf (langfristige) Wachstumsraten und kommen zu dem Ergebnis, dass Temperaturänderungen Produktivitätsverluste zur Folge haben, jedoch keinen nachweisbaren Einfluss auf langfristige Produktivitätswachstumsraten, wobei sie mögliche klimatische Einflüsse auf den Kapitalbestand, das Arbeitskräftepotenzial oder andere potenziellen Faktoren in der Analyse nicht berücksichtigen. Zu deutlich stärkeren Ergebnissen als die meisten anderen Autor:innen kommen Bilal und Känzig (2024) auf Basis ihrer Methode. Die Autor:innen argumentieren, dass globale Temperaturänderungen aufgrund der direkten Auswirkungen auf Extremwetterereignisse besser geeignet sind, die wirtschaftlichen Effekte zu identifizieren, als eine Aggregation lokaler klimatischer Effekte, welche zumeist mit geringeren Schadenseffekten verbunden sind. Nach ihren Schätzungen wäre ein Anstieg der globalen Temperatur um 1 °C mit einem Rückgang des weltweiten BIP um 12 Prozent verbunden, der insbesondere auf Produktivitätsverluste und klimabedingte Schäden zurückzuführen ist. Ihr Modell schätzt zudem einen weltweiten Produktivitätsrückgang von 2,5 Prozent und einen Anstieg der Kapitalabschreibungsrate um 0,3 Prozentpunkte bei einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 1 °C.

Die ökonomische Literatur zum Klimawandel diskutiert zunehmend die Frage, ob die Effekte der Temperaturerhöhung linear oder nichtlinear verlaufen. Während viele Modelle eine annähernd lineare Beziehung zwischen Temperaturänderung und BIP-Verlust annehmen (Bilal und Känzig, 2024; Garcia-León, 2015), weisen Studien wie Burke et al. (2015) darauf hin, dass mit zunehmendem Temperaturanstieg die wirtschaftlichen Schäden überproportional zunehmen. Nordhaus (2017) verdeutlicht dies ebenfalls in seiner Arbeit mit dem DICE-Modell, in der er eine quadratische Schadensfunktion unterstellt, um den stärkeren Anstieg der wirtschaftlichen Schäden bei Temperaturerhöhungen über 3–4 °C abzubilden. Dies impliziert, dass eine Erwärmung um 4 °C nicht einfach doppelt so starke Effekte wie eine um 2 °C auslösen könnte, sondern deutlich weitreichendere Auswirkungen hat. Potenzielle Kipp-Punkte im Klimasystem, wie das Abschmelzen großer Eisschilde oder das Auftauen von Permafrostböden, verstärken die methodische Herausforderung aus den empirischen Beobachtungen der bisherigen moderaten Erwärmung (ca. 1,1 °C seit der vorindustriellen Zeit) zuverlässige Schlüsse für künftige Entwicklungen zu ziehen (Lenton et al., 2019).

2.2 Produktivität

Die Produktivität wird häufig als einer der zentralen Kanäle identifiziert, über die der Klimawandel wirtschaftliche Auswirkungen entfaltet. Während zahlreiche Studien die Effekte des Klimawandels auf

das BIP insgesamt untersuchen (siehe Abschnitt oben), konzentrieren sich einige Analysen gezielt auf die Produktivität, da sie unmittelbar mit klimatischen Veränderungen verknüpft sein kann.

Burke et al. (2015) analysieren den Zusammenhang zwischen Temperatur und Produktivität auf globaler Ebene. Die Studie basiert auf Wirtschaftsdaten aus 166 Ländern über einen Zeitraum von 50 Jahren und berücksichtigt 36 Hauptklimarisiken, die in fünf Kategorien zusammengefasst werden. Ein zentrales Ergebnis ist, dass die Produktivität oberhalb einer optimalen durchschnittlichen Temperatur von 13 °C deutlich zurückgeht. Diese Effekte sind sowohl in der Landwirtschaft als auch in nicht-landwirtschaftlichen Sektoren zu beobachten und seit 1960 unverändert geblieben. Burke und Kolleg:innen betonen die Notwendigkeit neuer Anpassungsstrategien, um der künftigen Erwärmung entgegenzuwirken, insbesondere in Hochtemperaturregionen, in denen die Produktivitätsverluste besonders ausgeprägt sind.

Gosling et al. (2018) verwenden Klimamodellsimulationen von fünf verschiedenen Modellen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Arbeitsproduktivität in Europa zu bewerten. Ohne Klimaschutzmaßnahmen könnte die durchschnittliche tägliche Produktivität von Arbeiten im Freien in mehreren südeuropäischen Ländern, darunter Bulgarien, Griechenland, Italien, Mazedonien, Portugal, Spanien und die Türkei, klimabedingt bis zum Ende des Jahrhunderts um 10-15 Prozent sinken. In nordeuropäischen Ländern wie Dänemark, Estland, Finnland, Norwegen und Schweden wird mit einem mildereren Rückgang der Arbeitsproduktivität im Freien gerechnet (2-4 Prozent). Für Österreich wird ein Rückgang der durchschnittlichen täglichen Arbeitsproduktivität im Freien prognostiziert, der je nach den verwendeten Klima- und Wirkungsmodellen zwischen etwa 3 Prozent und 8 Prozent liegt. Das Ausmaß der Auswirkungen auf die Arbeitsproduktivität in Innenräumen ist im Allgemeinen rund 2-4 Prozentpunkte geringer, wobei es auch hier je nach Wirkungs- und Klimamodell deutlich unterschiedliche Schätzungen gibt.

2.3 Soziale Kosten von Kohlenstoff und Wohlfahrtsverlust

Die sogenannten sozialen Kosten von Kohlenstoff und die damit verbundenen Wohlfahrtsverluste sind ein zentrales Thema in der ökonomischen Analyse des Klimawandels. Sie repräsentieren eine der prominentesten Formen von Externalitäten, ein Konzept, das auf Arthur Cecil Pigou (1920) zurückgeht. Pigou definierte Externalitäten als Kosten oder Nutzen, die durch ökonomische Aktivitäten entstehen, aber nicht direkt im Marktpreis berücksichtigt werden. Im Kontext des Klimawandels stellen Treibhausgasemissionen eine negative Externalität dar, da ihre ökologischen und sozialen Folgen zumeist nicht hinreichend in die Produktions- und Konsumententscheidungen integriert sind. Die

Bepreisung von Kohlenstoff, etwa im Rahmen des EU-ETS oder der in Österreich im Jahr 2022 eingeführten CO₂-Bepreisung, dient der Internalisierung dieser externen Kosten.

In den Vereinigten Staaten wurde eine „Interagency Working Group“ von der Obama-Regierung mit der Ermittlung von „offiziellen“ sozialen Kosten des Kohlenstoffs befasst, siehe etwa Auffhammer (2018). Unter Verwendung von drei prominenten integrierten Bewertungsmodellen² wurden soziale Kosten auf Basis verschiedener Annahmen zu sozioökonomischen Variablen, der Diskontrate und einer Reihe anderer Parameter ermittelt. Das zentrale Ergebnis davon, das als Mittelwert von rund 50.000 Schätzungen mit einer Diskontrate von 3 Prozent ermittelt wurde, sind soziale Kosten in der Höhe von 42 Dollar pro Tonne CO₂ (bewertet zu Preisen 2007). Bei einer Diskontrate³ von 2,5 Prozent bzw. 5 Prozent würden sich die sozialen Kosten auf 62 Dollar bzw. 12 Dollar ändern. Auffhammer (2018) argumentiert, dass die auf integrierten Bewertungsmodellen basierenden Berechnungen von sozialen Kosten aber in der Regel auf veralteten Schadensfunktionen basieren. Auch Pindyck (2019) weist auf diesen Umstand hin und ermittelt anhand einer breiten Expert:innenumfrage alternative Schätzungen der sozialen Kosten des Kohlenstoffs, welche deutlich höher ausfallen als die oben angeführten Berechnungen der US-Regierung und durchschnittlich über 200 Dollar pro Tonne CO₂ liegen. Fokussiert man die Ergebnisse auf Expert:innen, die ein hohes Maß an Vertrauen in ihre Antworten ausgedrückt haben, erhält man niedrigere Werte, welche mit 80 bis 100 Dollar pro Tonne CO₂ jedoch immer noch deutlich über den meisten auf integrierten Bewertungsmodellen basierenden Berechnungen liegen. Kalkuhl und Wenz (2020) vergleichen ihre Berechnungen mit denen von Nordhaus (2017) und schätzen, dass die tatsächlichen sozialen Kosten einer Tonne CO₂ mit 73 Dollar, insbesondere aufgrund von Produktivitätsverlusten in heißeren Regionen, deutlich höher ausfallen.

Feyen et al. (2020) liefern eine umfassende Analyse der Wohlfahrtsverluste durch verschiedene Klimaauswirkungen, darunter extreme Hitze, Dürren und Flussüberschwemmungen in Europa. Die Autor:innen kommen zu dem Ergebnis, dass sich die Wohlfahrtsverluste in einem Szenario mit hohen Emissionen bis 2060 auf bis zu 175 Mrd. Euro jährlich belaufen könnten, wobei Südeuropa die schwerwiegendsten Auswirkungen zu spüren bekommt. Demnach löst die durch extreme Hitze verursachte menschliche Sterblichkeit die größten Wohlfahrtskosten aus. Fluss- und Küstenüberschwemmungen stellen die zweitgrößten negativen Effekte, insbesondere in Nord- und Mitteleuropa, dar. Während Trockenheit in Süd- und Westeuropa erhebliche Wohlfahrtsverluste verursacht, ergeben sich in Nordeuropa teilweise sogar Vorteile, insbesondere in der Landwirtschaft.

² Das DICE-Modell von Nordhaus, das FUND-Modell von Anthoff und Tol und Hopes PAGE Modell.

³ Die Diskontrate spiegelt die Präferenz von Menschen für die Gegenwart wider, der Zukunft wird ein geringeres Gewicht beigemessen. Je höher die Diskontrate, desto stärker wird die Gegenwart gewichtet.

Nach Van der Wijst et al. (2021) beispielsweise belaufen sich die kumulierten abdiskontierten Kosten der Klimaerwärmung auf Basis einer Damage-Function bis zum Ende des Jahrhunderts in Österreich auf 140 Mrd. Euro bis 380 Mrd. Euro. In Deutschland sind die Folgen mit rund 2.100 Mrd. Euro bis 6.500 Mrd. Euro noch deutlich stärker, auch auf die Anzahl der Einwohner:innen umgelegt.

Grundsätzlich sind die sozialen Kosten von Kohlenstoff ein wesentliches Konzept zur Abbildung der externen Kosten und können Anhaltspunkte für die Schäden geben, die durch Treibhausgasemissionen verursacht werden. Die recht großen Schwankungsbreiten der Schäden erklären sich unter anderem durch Unsicherheiten, wie sich der Klimawandel auf z.B. die Mortalität oder die Volkswirtschaft auswirken wird, aber auch durch schwierige Fragen, wie etwa der Wert eines Lebens ökonomisch bewertet werden kann oder welcher Diskontfaktor angewendet werden sollte. Nach Auffhammer (2018) geht ein neuerer Strang der empirischen Forschung zu Schadensfunktionen bzw. den sozialen Kosten von Kohlenstoff zudem der Frage nach, ob bzw. inwieweit sich die Zusammenhänge zwischen Klima bzw. Wetter und ökonomischen Auswirkungen ändern, wenn sich das Klima ändert. Mit besseren Informationen und einem besseren Verständnis der Zusammenhänge ist von genaueren Abschätzungen in der Zukunft zu rechnen.

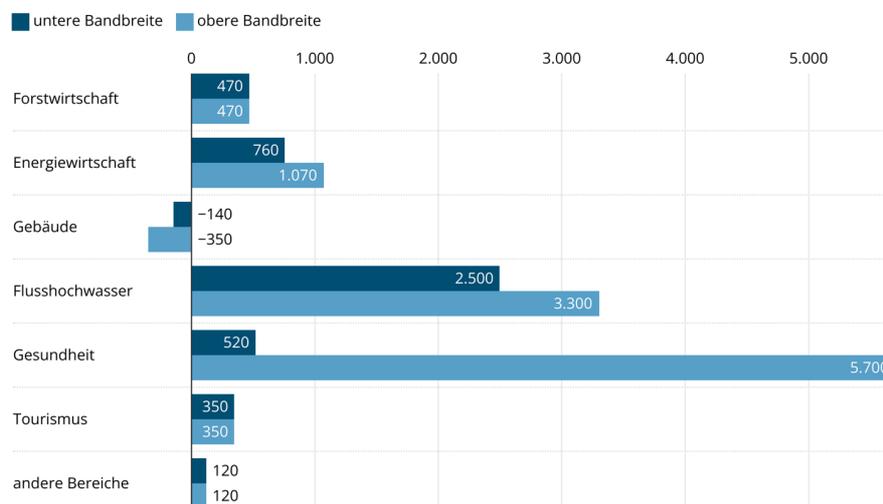
2.4 Konzentration auf bestimmte Sektoren und Länder

Die bisher umfangreichste Analyse über die Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Volkswirtschaft stellt das Projekt COIN (COst of INaction) dar, welches 37 aus insgesamt 80 identifizierten Wirkungsketten an Klimawandelfolgen monetär quantifiziert (Steininger et al., 2020). Im Szenario einer globalen Klimaentwicklung, in dem bis 2050 eine Erwärmung von maximal 2 °C über dem vorindustriellen Niveau nicht überschritten wird, ergeben sich in Österreich laut COIN in manchen Bereichen auch Vorteile, beispielsweise durch eine Reduktion der Heizkosten und eine Ausweitung der Vegetationsperiode. In der Mehrheit der Bereiche überwiegen jedoch die Schäden, beispielsweise in Form von Fluss-Hochwasser, Dürren oder Schneemangel im Wintertourismus. Laut ihren Schätzungen steigen die durchschnittlichen wetter- und klimawandelbedingten Schäden in Österreich in den quantifizierten Bereichen pro Jahr von derzeit rd. 2 Mrd. Euro auf 2,5 bis 5,2 Mrd. Euro in der Periode um 2030 bzw. 4,3 Mrd. bis 10,8 Mrd. Euro bis 2050 an. Zudem wird eine hohe jährliche Fluktuation der Schäden und Verluste erwartet, z.B. aufgrund von Extremwetterereignissen in gewissen Regionen, und die Belastung wird für die tatsächlich Betroffenen somit weitaus größer sein, als es Durchschnittswerte widerspiegeln.

Neben den direkten klimabedingten Kosten berechnen Steininger et al. (2020) auch anfallende grenzüberschreitende Kosten, die beispielsweise über internationale Handelsverflechtungen entstehen.

So stellen beispielsweise China und Indien wichtige Zuliefer- und Absatzmärkte dar und sind stärkeren klimatischen Veränderungen ausgesetzt als Österreich. Bei einer globalen Erwärmung von 2 °C (bis zum Ende des Jahrhunderts) werden die grenzüberschreitenden Kosten für Österreich für 2050, unter Berücksichtigung von drei relevanten Klimawandelfolgen – Anstieg des Meeresspiegels, Veränderung der Arbeitsproduktivität durch Hitze und Auswirkungen auf landwirtschaftliche Produktion – auf 1,5 Mrd. Euro jährlich geschätzt, was ein 0,3 Prozent niedrigeres BIP gegenüber dem Referenzszenario ohne Klimawandel bedeutet.

Abbildung 1: Folgekosten durch klimawandelbedingte Schäden in Österreich lt. Steininger, 2050, in Mio. Euro



Annahme: Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen, die global bis 2050 zu nicht mehr als 2 Grad Erwärmung führt. 37 von 80 Wirkungsketten konnten monetarisiert werden.

Quelle: Steininger et al. (2020).

ECO AUSTRIA
INSTITUT FÜR
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Zudem hat der Klimawandel Auswirkungen auf die österreichische Energiewirtschaft, insbesondere auf Wasserkraftwerke, welche 2023 rund 60 Prozent der inländischen Stromproduktion ausmachten (BMK, 2024a). Laut Schleyden et al. (2019) führen klimatische Veränderungen in Österreich zu einer Reduktion von aus Wasserkraft erzeugter Energie um 10 Prozent bis 2070. Das hierbei herangezogene Klimaszenario rechnet mit geringer Klimaerwärmung (RCP4.5), in einem Szenario mit stärkerer Erwärmung (RCP8.5) wird ein noch stärkerer Rückgang prognostiziert. Dieses Ergebnis ist aber vor dem Hintergrund erheblicher Unsicherheiten u.a. in Bezug auf die Niederschlagsmengen mit Vorsicht zu betrachten. Niedrigerer Produktion in Sommermonaten steht eine höhere Produktion in den Wintermonaten entgegen, die das Angebot an Energie stabilisieren sollte (AFRY Austria, 2023). Darüber hinaus können Verluste in den Sommermonaten durch den Ausbau von Photovoltaik und Windenergie abgedeckt werden.

Auch Labriet et al. (2015) bewerten die Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiesektor, wobei ihr Schwerpunkt auf dem Heiz- und Kühlbedarf in verschiedenen Regionen liegt. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass steigende Temperaturen den Kühlbedarf in Südeuropa erhöhen, während der Heizbedarf in Nordeuropa sinkt, was die regionale Energienachfrage verändert. Labriet und Kolleg:innen weisen darauf hin, dass diese Veränderungen erhebliche Anpassungen der Energieinfrastruktur erfordern.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiesektor und die Infrastruktur sind eng miteinander verknüpft, und beide Bereiche sind stark von klimatischen Veränderungen und Extremereignissen abhängig. Lincke et al. (2018) untersuchen die Anfälligkeit der Infrastruktur und insbesondere der Straßenverkehrsinfrastruktur in Europa, mit besonderem Schwerpunkt auf dem Hochwasserrisiko an Küsten und Flüssen. Die Autor:innen kommen zu dem Ergebnis, dass insbesondere der Anstieg des Meeresspiegels in Abhängigkeit vom Klimawandelszenario zu massiven Schäden in Küstenregionen führen könnte, wobei diese Kosten durch Anpassungsmaßnahmen deutlich reduziert werden könnten.

Die Landwirtschaft ist nicht nur direkt von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen, sondern auch stark von globalen Lieferketten und Lebensmittelpreisen abhängig. Viele Regionen, darunter Europa, sind auf Importe bestimmter Grundnahrungsmittel wie Soja oder Mais aus dem globalen Süden angewiesen, wodurch klimabedingte Produktionsverluste in anderen Teilen der Welt auch hier wirtschaftliche Folgen nach sich ziehen können. Boere et al. (2019) zeigen, dass der Klimawandel in Europa insbesondere Süd- und Osteuropa durch Ertragsrückgänge bei klimasensiblen Kulturen wie Mais sowie durch Verluste bei der Waldbedeckung belastet, während Nordeuropa durch moderate Erwärmung sogar teilweise profitieren könnte. Parallel dazu finden Nazareth et al. (2022), dass steigende Temperaturen und veränderte Niederschlagsmuster in Brasilien zu erheblichen Produktionsverlusten bei Grundnahrungsmitteln wie Sojabohnen und Mais führen können. Beide Studien unterstreichen die Dringlichkeit von an den Klimawandel angepasster landwirtschaftlicher Praktiken, um sowohl die lokale als auch die globale Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die Abhängigkeit von globalen Produktions- und Handelsnetzwerken bedeutet zudem, dass die landwirtschaftlichen Folgen des Klimawandels keine isolierten regionalen Probleme sind, sondern weitreichende globale Auswirkungen haben.

Neben den Herausforderungen in der Land- und Energiewirtschaft spielt auch die Verfügbarkeit von Wasserressourcen eine entscheidende Rolle, da der Klimawandel sowohl den Zugang zu Wasser als auch dessen Nutzung in zentralen Wirtschaftssektoren erheblich beeinflusst. Roson und Damania (2016) verwenden ein allgemeines Gleichgewichtsmodell, um die makroökonomischen Auswirkungen von Wasserknappheit unter verschiedenen Klimawandelszenarien zu simulieren. Ihre Studie kommt zu dem

Ergebnis, dass Wasserknappheit das Wirtschaftswachstum signifikant begrenzen könnte, insbesondere in trockenen Regionen wie dem Nahen Osten und Teilen Asiens, wobei die negativen Auswirkungen durch verschiedene Anpassungsmaßnahmen gedämpft werden könnten, wie etwa eine Produktionsverschiebung hin zu weniger wasserintensiven Gütern oder Importe von wasserintensiven Produkten. Auch Teotónio et al. (2020) untersuchen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen und kommen zu dem Ergebnis, dass steigende Temperaturen die Knappheit von Wasser in den Mittelmeerländern, insbesondere in der Landwirtschaft, erhöhen. Beide Studien veranschaulichen die Bedeutung eines anpassungsfähigen Wassermanagements für die Aufrechterhaltung der wirtschaftlichen Produktivität, insbesondere in wasserarmen Regionen.

3. KLIMAWANDELANPASSUNG UND IHRE AUSWIRKUNGEN

In der Literatur finden sich mehrere Herangehensweisen, um die ökonomischen Folgen von Anpassungen zu ermitteln. Wesentliche Werkzeuge in diesem Bereich sind Integrierte Bewertungsmodelle, ökonometrische Analysen, makroökonomische Simulationsmodelle und Entscheidungsmodelle (siehe Fankhauser, 2017). Integrierte Bewertungsmodelle werden bereits seit Mitte der 1990er Jahre angewendet (siehe beispielsweise Weyant et al., 1995). Integrierte Modelle sind sehr komplex und simulieren sowohl die Entwicklung des Klimas als auch Auswirkungen auf die Wirtschaft auf Grundlage einer Damage-Funktion. Diese beurteilten die Folgen zumeist aus einer technischen Perspektive. Heutzutage werden die Modelle aufgrund des Anwendungsgebiets nach sektorenübergreifenden Modellen (cross-sectoral optimization models) und Modellen zur Bestimmung der ökonomischen Wirkungen von Klimapolitiken (economic assessment of climate policies) unterschieden (siehe Schwarze et al. 2022). Die erste Art dieser Modelle dreht sich um wohlfahrtsorientierte optimale Wachstumsmodelle, die zweite Art um numerische Simulationsmodelle zur Minimierung der Kosten von Klimapolitiken. Aufgrund der Komplexität des Einflusses des Klimas und entsprechender Anpassungsmaßnahmen auf die Volkswirtschaft werden zumeist weitgehende Abstraktionen vorgenommen.

Watkiss (2022) beschreibt wesentliche Herausforderungen für die Implementierung von Anpassungsmaßnahmen in Modellen. So besteht keine eindeutige Zielvorgabe, die von den Akteuren verfolgt wird. So ist bereits die Zielvorstellung des öffentlichen Bereichs nicht eindeutig. Die dynamische Dimension hinsichtlich der Klimafolgen sowie der Anpassungsmaßnahmen und deren Interaktionen implizieren nicht-lineare Zusammenhänge und erhöhen die Komplexität, insbesondere vor dem Hintergrund der Unsicherheit bezüglich der Entwicklungen über einen langen Zeitraum. Die große Anzahl der Akteure ist ebenso zu berücksichtigen. Allein im öffentlichen Bereich sind internationale, supranationale, nationale und regionale Ebenen zu beachten. Aber insbesondere im privaten Bereich ist diese um ein Vielfaches größer. Des Weiteren bestehen auch Hindernisse (beispielsweise rechtliche Gegebenheiten) für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, die die Implementierung verhindern oder verzögern können. Diese und weitere Beschränkungen machen eine mikrofundierte Modellanalyse äußerst schwierig. Deswegen werden Anpassungsmaßnahmen entweder mit einem hohen Abstraktionsgrad oder lediglich implizit (Schadensfunktion nach Berücksichtigung von Anpassungsmaßnahmen) implementiert. Wohlfahrtsanalysen stellen ein weiteres Problem dar, da sehr unterschiedliche Vorstellungen bezüglich der Ausprägung wesentlicher Parameter der Analyse bestehen.

Dies wird beispielsweise von Pindyck (2013) an integrierten Modellen zur Abschätzung der ökonomischen Effekte des Klimawandels kritisiert.

Ökonometrische Analysen haben hingegen zum Ziel, die Reaktionen von Marktteilnehmer:innen von Klima- und Wetterereignissen zu verstehen. Auf Basis von Mikrodaten über private Haushalte, Unternehmen und staatliche Ebenen werden Verhaltensanpassungen oder Auswirkungen auf (volkswirtschaftliche) Kenngrößen abgeschätzt. Um diese Ergebnisse verwenden zu können, wird unterstellt, dass sich die einzelnen Gruppen in der Zukunft vergleichbar verhalten wie in der Vergangenheit. In Bezug auf die verwendeten Daten werden einerseits Querschnittsdaten, also Daten über verschiedene Länder oder Regionen zu einem Zeitpunkt, Zeitreihendaten, also Daten über ein Land oder eine Region im Zeitverlauf, oder Paneldaten verwendet. Paneldaten verknüpfen Querschnitt- mit Zeitreihendaten und benutzen Informationen von verschiedenen Ländern oder Regionen im Zeitverlauf.

Bei Querschnittsdaten kann man unterstellen, dass es sich um langfristige Gleichgewichte in verschiedenen Klimaregimen handelt, die verglichen werden. Auf Basis dieser Schätzungen sollen die langfristigen Anpassungsstrategien bei verschiedenen Klimazuständen ermittelt werden. Problematisch dabei ist, dass Klimaeffekte von anderen Einflussgrößen, wie Kultur, Geschichte oder Institutionen nicht getrennt ermittelt werden können. Des Weiteren können daraus auch keine Informationen hinsichtlich des Übergangs von Anpassungsmaßnahmen bei Klimaveränderungen gewonnen werden.

Bei Zeitreihendaten ist die Trennung zwischen Klimaeinflüssen und diesen anderen Faktoren möglich, da sich diese im Zeitverlauf nur geringfügig ändern. Da andererseits Zeitreihen zumeist nur kürzere Perioden betrachten, sind Klima- von Wetterveränderungen schwer zu trennen. Die Ergebnisse zeigen daher eher kurzfristige Anpassungen an Wetter- anstatt langfristiger Anpassungen an Klimaveränderungen.

Paneldaten ermöglichen einerseits aufgrund der Querschnittsstruktur die (teilweise) Trennung zwischen Anpassungen an Klima- und Wetterveränderungen und andererseits lässt sich aus den Zeitreihendaten von anderen Einflussgrößen abstrahieren. Von besonderer Bedeutung ist, dass im Modell Nicht-Linearitäten berücksichtigt werden. Diese erlauben die zumindest teilweise Identifizierung der Anpassungsmaßnahmen an das Klima (siehe beispielsweise McIntosh und Schlenker, 2006; Burke et al., 2015 oder Kolstad und Moore, 2020). Nach Mérel und Gammans (2021) repräsentiert⁴ der nicht-lineare Zusammenhang eine Kombination aus kurz- und langfristigen Effekten, wobei der langfristige Effekt

⁴ Ist die Verteilung der Wetterdaten schief, dann können die Anpassungseffekte verzerrt sein.

umso leichter ermittelt werden kann, je ausgeprägter die Variation des Klimas zwischen den Regionen ist.

In der Literatur werden auch makroökonomische Modelle verwendet, um die gesamtwirtschaftlichen Zusammenhänge abzubilden. So können Anpassungsmaßnahmen über Preiseffekte Wirkungen auf andere Sektoren ausüben oder Beschäftigungseffekte das Arbeitsangebot oder die Lohnentwicklung in anderen Sektoren beeinflussen. Diese Zusammenhänge können in einem entsprechenden Makromodell berücksichtigt werden. Obwohl auch über ökonometrische Modelle makroökonomische Effekte ermittelt werden können, erlauben Simulationsmodelle weitreichendere Untersuchungen spezifischer Szenarien. In der praktischen Anwendung besteht meist das Problem, dass Simulationsmodelle Klimaänderungen nicht modelliert haben und damit Klimaänderungen nicht direkt implementiert werden können.

Bei Entscheidungsmodellen geht es insbesondere darum, wie Entscheidungen unter großer Unsicherheit getroffen werden sollen. Die Unsicherheit bezieht sich dabei sowohl auf die Auswirkungen des Klimawandels, beispielsweise auf die Häufigkeit von Wetterextremen, als auch darauf, inwiefern Anpassungsmaßnahmen Klimafolgen unterbinden. Sie ist damit bei Anpassungsentscheidungen größer als bei Vermeidungsentscheidungen, da zur Unsicherheit hinsichtlich der Klimafolgen auch noch die Unsicherheit hinsichtlich der Wirksamkeit von Adaptierungen hinzukommt. Diese nimmt darüber hinaus noch zu, wenn man Entscheidungen auf der regionalen und lokalen Ebene betrachtet (siehe Fankhauser, 2017).

Nachfolgend wird die Literatur zu Anpassungsmaßnahmen zusammengefasst. Dabei erfolgt eine Unterscheidung nach der gewählten Herangehensweise, modellbasiert oder empirisch, und nach dem Untersuchungsgegenstand, wie Folgen für die Wertschöpfung, die Wohlfahrt oder einzelne sektorale Bereiche.

3.1 Modellbasierte Abschätzungen über Effekte der Anpassungsmaßnahmen

Effekte von Klimawandelanpassungsmaßnahmen auf wirtschaftlichen Output

Im Abschnitt 2.1 wurden die generellen ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels anhand rezenter Literatur diskutiert. Im Folgenden soll ein Überblick darüber gegeben werden, inwiefern Anpassungsmaßnahmen potenzielle Verluste im wirtschaftlichen Output vermindern können und welche Netto-Auswirkungen (insofern ausgewiesen) verschiedenste Studien auf das Bruttoinlandsprodukt ausweisen.

Aaheim et al. (2012) verwenden das Computable General Equilibrium (CGE) Modell GRACE, um die wirtschaftlichen Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die europäischen Volkswirtschaften zu

analysieren. Das Modell beinhaltet sogenannte „autonome“ Anpassungspfade wie sektorale Produktionsverlagerungen in Regionen mit besseren Produktionsbedingungen und Faktorsubstitution, wie der verstärkte Einsatz von Maschinen zur Kompensation der Produktivitätsverluste von Beschäftigten aufgrund höherer Temperaturen. Das Papier leitet sogenannte „impact functions“ ab, die zur Quantifizierung der Effekte zwischen klimarelevanten und ökonomischen Variablen dienen. Diese Funktionen werden dann in das Modell integriert, um die dynamischen Auswirkungen dieser Variablen zu modellieren. Für die Analyse wird Europa in 85 Regionen unterteilt, um regionale Effekte ableiten zu können und um Grenzen für die Mobilität von Ressourcen und Arbeitskräften zu berücksichtigen.

Nach den Simulationsergebnissen führt ein globaler Temperaturanstieg von 2 °C unter Berücksichtigung der Anpassungen europaweit zu BIP-Verlusten von 0,03 Prozent, wobei die Wirtschaft im Osten Europas profitiert, während in Südeuropa die Wirtschaftsleistung um bis zu 0,1 Prozent zurückgeht. Dies ist vor allem auf wirtschaftliche Einbußen in den Sektoren Landwirtschaft und Tourismus zurückzuführen. Bei einem 4 °C-Szenario steigen die jährlichen BIP-Verluste und liegen für die östlichen Länder bei etwa 0,1 Prozent und in den südlichen Regionen bei 0,6-0,7 Prozent. Für Österreich belaufen sich die Verluste auf 0,1 bis 0,2 Prozent. Das Papier weist keine Werte für ein Klimaerwärmungsszenario ohne autonome Anpassung aus, sodass die positiven Effekte der Anpassung nicht eruiert werden können. Insgesamt sind die Effekte der Erwärmung nach Berücksichtigung der autonomen Reaktionen im Vergleich zu anderen Analysen äußerst moderat. Es zeigt sich auch, dass alle Sektoren zumindest indirekt, beispielsweise über Vorleistungen, betroffen sind. Zwischen den einzelnen europäischen Ländern zeigt sich eine erhebliche Variation in der Exponiertheit, wobei die größten Unterschiede in der Land- und Forstwirtschaft, im Energiesektor und im Tourismus bestehen. Im Energiesektor wird für die meisten europäischen Länder ein Rückgang der Energienachfrage prognostiziert, mit Ausnahme von Südeuropa, wo der Stromverbrauch voraussichtlich steigen wird.

Wei und Aaheim (2023) liefern einen Überblick über die Literatur zur Modellierung von Anpassungsmaßnahmen in CGE-Modellen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass bereits autonome Anpassungsmaßnahmen, also Maßnahmen, die ohne gezielte politische Steuerung oder Beanreizung getroffen werden, die negativen ökonomischen Wirkungen des Klimawandels deutlich reduzieren können. In der Literatur wurde dies laut den Autoren aber bisher nicht ausreichend adressiert.

Bachner et al. (2022) untersuchten die Anpassung an den Meeresspiegelanstieg (SLR - sea level rise) aus einer globalen Perspektive für den Zeitraum bis 2050. Die Arbeit verwendet das DIVA-Modell zur Bottom-up-Modellierung der Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs in Küstenregionen und nimmt deren Ergebnisse als Input für das multiregionale globale CGE-Modell „COIN-INT“. Die Ergebnisse zeigen, dass ohne Anpassung im RCP8.5-Szenario die BIP-Verluste durch den SLR in Italien und

Nordeuropa bis zu 4,5 Prozent betragen können, während in Österreich der Effekt aufgrund der fehlenden direkten Betroffenheit und der damit verbundenen Verbesserung im internationalen Wettbewerb sogar leicht positiv ist. Nach den Autoren führt bereits die autonome Anpassung über Migration zu einer deutlichen Reduktion der Verluste an wirtschaftlicher Aktivität (in Italien beispielsweise auf etwa 1 Prozent). Geplante Anpassungen (Dämme) reduzieren die Auswirkungen noch weiter.

In der oben schon zitierten Studie von Steininger et al. (2020) werden auch die volkswirtschaftlichen Effekte von Anpassungsmaßnahmen in Österreich dargestellt. Demnach reduzieren sich die volkswirtschaftlichen Schäden des Klimawandels (gemessen in Wohlfahrtseinheiten) durch ein Paket von Anpassungsmaßnahmen in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, Schutz vor Naturgefahren und Katastrophenmanagement um 30 Prozent. Die Effekte der Anpassungsmaßnahmen sind für das BIP (70 Prozent weniger Schaden) bzw. die Beschäftigung (50 Prozent weniger Anstieg der Arbeitslosigkeit) noch stärker. Für Maßnahmen bei der Straßen- und Infrastruktur sind die positiven Folgen der Anpassung zwar etwas schwächer, aber immer noch beträchtlich (rund 30 Prozent weniger Schaden in Bezug auf Wohlfahrt und rund 50 Prozent weniger Schaden beim BIP).

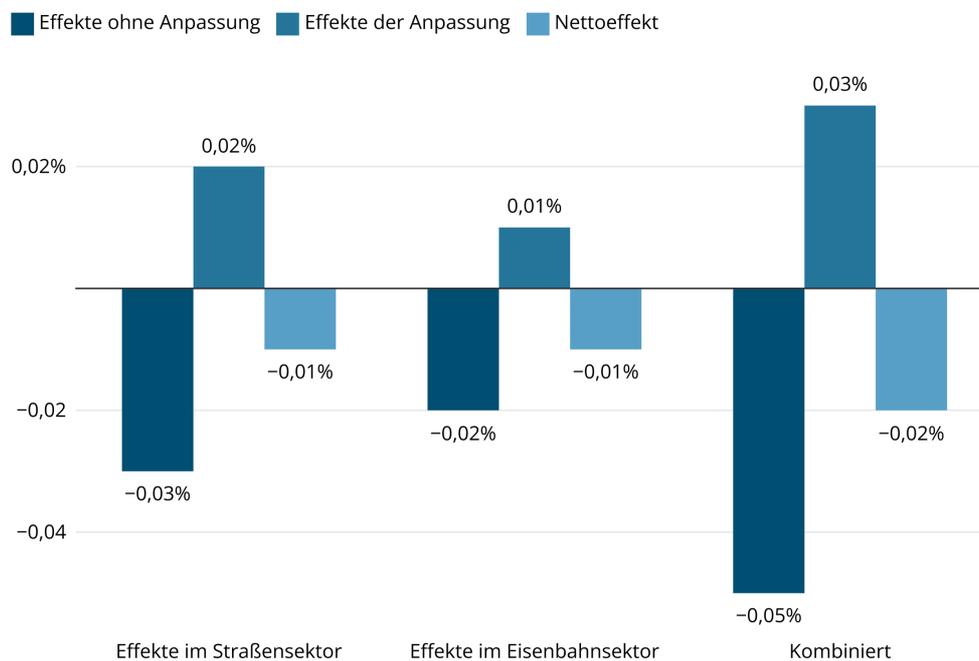
Sektoraler und regionaler Schwerpunkt

Während Klimawandelanpassungsmaßnahmen insgesamt auf gesamtwirtschaftlicher Ebene Impulse setzen können, variieren die Auswirkungen je nach Maßnahme. Im Folgenden werden relevante Auszüge der Literatur diskutiert, welche eine detailliertere Betrachtung der verschiedenen Wirkungskanäle und Effekte ermöglichen.

Bachner (2017) konzentriert sich auf die Auswirkungen des Klimawandels auf das österreichische Landverkehrssystem. und wie Anpassungsmaßnahmen diese Auswirkungen potenziell abmildern können. Die Studie basiert auf Daten für den Zeitraum 2000-2010 und verwendet ein CGE-Modell zur Ableitung der Auswirkungen. In diesem Rahmen werden sieben verschiedene Arten von Anpassungsmaßnahmen betrachtet, die für den Straßen- und Schienenverkehr relevant sind und in „harte“ und „weiche“ Kategorien eingeteilt werden. Zu den harten Maßnahmen zählen z.B. der Ausbau von Entwässerungssystemen, zusätzliche hydrologische Stationen für Frühwarnsysteme oder erhöhte Ausgaben für den Schutz vor Unwettern und Lawinen. Zu den weichen Kategorien gehören beispielsweise ein intensiveres Vegetationsmanagement oder häufigere Kontrollen des Straßenzustands. Für jede dieser Kategorien wird eine Art Kosten-Nutzen-Maß (damage reduction potential, DRP) durch zusätzliche Variablen wie Abschreibungsraten, OPEX oder Arbeitskräfteintensität ermittelt, das definiert, wie effektiv die Maßnahme bei der Schadensminderung ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die jährlichen BIP-Verluste aufgrund zunehmender Wetterereignisse im Jahr 2050 auf 142 Mio. Euro (-0,05 Prozent) belaufen. Darin sind nicht nur die direkten Effekte auf den Landverkehr, sondern auch die indirekten Effekte auf andere Wirtschaftssektoren berücksichtigt. Anpassungsmaßnahmen reduzieren diese Verluste auf 63 Mio. Euro (-0,02 Prozent), was einem Nettonutzen von 79 Mio. Euro entspricht.

Abbildung 2: Prozentuelle Veränderung der Wertschöpfung mit und ohne Anpassung im Verkehrssektor



Quelle: Bachner (2017). • Erstellt mit Datawrapper

Gonseth und Vielle (2019) beschäftigen sich mit den positiven Folgen von Anpassungen auf den Wintertourismus in der Schweiz, wobei unter Anpassungen Beschneigungstechnologien verstanden werden. Die Analyse basiert auf regionalen Informationen zu erwarteten Veränderungen der Schneesicherheit. Sie berücksichtigen in verschiedenen Szenarien darüber hinaus, dass auch andere Länder, wie beispielsweise Österreich, mit denselben Problemen konfrontiert sind. Nach deren Untersuchung betragen die Wohlfahrtseffekte des Klimawandels nach Anpassung in der Schweizer Ökonomie zwischen -23 Mio. CHF und +113 Mio. CHF im Jahr 2050, abhängig davon, welche Annahmen für den Rest der Welt getroffen werden. Die direkten Wirkungen der Anpassungen lassen sich nur im Szenario ermitteln, in welchem eine unveränderte Situation im Rest der Welt unterstellt wird, d.h. beispielsweise Österreich ist nicht vom Klimawandel betroffen. In diesem Szenario fällt die

Wertschöpfung ohne Adaptierung zwischen 5,8 und 7,9 Prozent, mit Adaptierung fällt der Rückgang mit 3,6 Prozent bis 4,9 Prozent deutlich geringer aus.

Fried (2018) konzentriert sich auf die Frage, wie Investitionen in Anpassungsmaßnahmen und Katastrophenmanagementstrategien auf Bundesebene die tatsächlichen Schäden am physischen Kapitalstock durch Extremwetterereignisse wie Tornados und Schneestürme in den USA beeinflussen. Die Studie verwendet ein quantitatives Makromodell mit regionaler Differenzierung, wobei die Regionen in unterschiedlichem Ausmaß von Extremwetterereignissen betroffen sind. Jede Region entscheidet autonom, wie viel sie in Anpassungsmaßnahmen und Versicherungen gegen die oben genannten Wetterereignisse investiert. Die zentrale Gebietskörperschaftsebene erhebt von jeder Kommune eine Steuer und verwendet die Einnahmen für das Katastrophenmanagement und Unterstützungsmaßnahmen für die von den Wetterereignissen betroffenen Regionen sowie für die Bereitstellung von Fördermitteln für Anpassungsinvestitionen. Diese Mechanismen spiegeln die Handlungsmöglichkeiten der Federal Emergency Management Agency (FEMA) in den USA wider.

Die Ergebnisse zeigen, dass von der zentralen Ebene subventionierte und von den Kommunen installierte Anpassungsinvestitionen, wie z.B. Dämme, die Schäden in den Hochrisikogebieten der USA um 7,6 Prozent reduzieren, was zu jährlichen Einsparungen von 7,5 Mrd. USD (zu Preisen von 2016) führt. Die Bundeskatastrophenhilfe ohne Zuschüsse für Anpassungsinvestitionen impliziert jedoch eine erhebliche „moral hazard“-Problematik, da sie keine Anreize für autonome Anpassungsinvestitionen bietet, sodass sich die Schäden in diesem Fall um fast 2 Mrd. USD pro Jahr erhöhen. Die kombinierte Wirkung von FEMA-Hilfe und Zuschüssen führt zu mehr als doppelt so viel Anpassungskapital.

Pérez-Blanco et al. (2022) simulieren mit Hilfe eines Modellrahmens die Wasserpreise im nordspanischen Einzugsgebiet des Douro, um die makroökonomischen und hydrologischen Auswirkungen von Konsumententscheidungen der Landwirte bezüglich des Wasserverbrauchs zu untersuchen. Die Hauptmotivation für die Analyse war, dass existierende hydrologische Modelle oft das Verbraucherverhalten (Mikro-Perspektive) und ökonomische Rückkopplungseffekte (Makro-Perspektive) vernachlässigen. Aus diesem Grund besteht die Studie aus drei methodischen Komponenten: (I) ein mikroökonomisches Modul, in dem die Entscheidungen der Landwirte hinsichtlich ihrer Pflanzenwahl modelliert werden; (II) ein makroökonomisches Modul, in dem ein regionales CGE-Modell verwendet wird; und (III) ein hydrologisches Modell, das Informationen darüber liefert, wie verschiedene Prozesse im lokalen Wasserkreislauf ablaufen.

Mit Hilfe dieser Module werden 10 Fälle simuliert, in denen die Wassergebühren im Douro-Gebiet auf bis zu 0,10 Euro pro Kubikmeter festgesetzt werden können. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung

des Wasserpreises zu einer Verringerung der Wasserentnahme für Bewässerungszwecke und zu einer Verlagerung der Landnutzung hin zum Regenfeldbau führen würde. Diese Veränderungen haben auch ein geändertes Angebot an landwirtschaftlichen Produkten und Preiseffekte zur Folge.

Colelli et al. (2022) gehen der Frage nach, wie Klimaanpassungsmaßnahmen und Klimaschutzmaßnahmen sich gegenseitig beeinflussen. Sie konzentrieren sich auf die Abschätzung des zukünftigen Energieverbrauchs im Zusammenhang mit Klimaanpassungsmaßnahmen und analysieren, wie die steigende Nachfrage Klimaschutzmaßnahmen beeinflusst. Für die Analyse wird das „WITCH“-Modell verwendet, ein Integrated Assessment Model, welches die Ökonomie, die Energiesysteme und das Klima abbildet. Die Analyse konzentriert sich nur auf Anpassungsmaßnahmen, die sich direkt auf den Energieverbrauch auswirken, wie z.B. die Nutzung von Klimaanlagen, und berücksichtigt keine anderen Faktoren, wie z.B. Änderungen in der Gebäude- und Stadtplanung.

Die Autoren kommen auf Basis der Modellanalyse zu dem Ergebnis, dass die Anpassung bei steigenden Temperaturen den weltweiten Energiebedarf bis 2050 um 7 Prozent und bis 2100 um 18 Prozent erhöhen würde. Damit ist im Schnitt auch ein höherer Verbrauch an fossilen Energieträgern um 2,5 Prozent verbunden. Die Folgen sind nach der Analyse jedoch geographisch sehr ungleich verteilt. Während in einigen Regionen, wie in den afrikanischen Ländern oder im mittleren Osten, der Anstieg besonders hoch ist, fällt er in OECD-Ländern deutlich niedriger aus.

Das Papier betont die Interdependenz von Minderungs- und Anpassungsmaßnahmen: Einerseits sind Minderungsmaßnahmen notwendig, um die anpassungsbedingte Energiebelastung zu reduzieren, andererseits spielen Anpassungsmaßnahmen eine wichtige Rolle, um zukünftige klimabedingte Schäden zu verringern.

Fiskalische Implikationen von Anpassungsmaßnahmen

Die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen hat nicht nur direkte Auswirkungen auf die österreichische Wirtschaft, sondern über verschiedene Wirkungskanäle auch auf die öffentlichen Finanzen.

Bachner et al. (2019) analysieren mit Hilfe eines allgemeinen Gleichgewichtsmodells (CGE) die Auswirkungen der Anpassung an den Klimawandel auf die öffentlichen Haushalte in Österreich. Die Kanäle, über die sich der Klimawandel auf die öffentlichen Haushalte auswirkt, sind einerseits öffentliche Ausgaben zur Schadensbehebung (direkter Effekt) und andererseits Veränderungen der Steuerbasis und des öffentlichen Konsums und der Transferleistungen (indirekter Effekt).

In der Analyse werden 3 Szenarien betrachtet: ein Basisszenario ohne Klimawandel, ein „Impact“-Szenario mit Auswirkungen des Klimawandels ohne Anpassung und ein Szenario mit Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen. Der Schwerpunkt liegt auf der Anpassung in den Bereichen Land- und

Forstwirtschaft und Katastrophenmanagement, da diese nach Ansicht der Autoren am stärksten vom Klimawandel betroffen sein werden. In der Analyse werden nur öffentliche Anpassungsmaßnahmen behandelt, private Maßnahmen gehen nicht in die Analyse ein. Um die staatlichen Ausgaben für Anpassungsmaßnahmen berechnen zu können, wurden Elemente des nationalen Budgets analysiert und nach Klimarelevanz und Effektivität kategorisiert. Anschließend wurde ein CGE-Modell verwendet, in das der Klimawandel durch verschiedene Faktoren wie Änderungen der Produktionskosten oder der Produktivität eingeführt wurde. Anpassung wurde in das Modell integriert, indem Kosten und Nutzen bestimmter Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Anpassungsmaßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft sowie im Katastrophenmanagement die BIP-Verluste im Jahr 2050 von 0,15 Prozent in einem Szenario ohne Anpassung auf 0,06 Prozent reduzieren könnten, was einem Nettonutzen von 0,09 Prozentpunkten entspricht. Die Studie hebt hervor, wie Anpassungsmaßnahmen staatliche Unterstützungszahlungen und Arbeitslosigkeit reduzieren und gleichzeitig die Steuereinnahmen in allen Kategorien mit Ausnahme der Mehrwertsteuer erhöhen. Die Ergebnisse unterstreichen die makroökonomischen und fiskalischen Vorteile von öffentlichen Anpassungsinvestitionen, trotz der zusätzlichen öffentlichen Anpassungskosten.

Preinfalk (2021) gibt einen umfassenden Überblick über Anpassungsmaßnahmen und erläutert, wie Klimaanpassung in den letzten zwei Jahrzehnten zu einer Priorität auf EU-Ebene wurde. Die EU hat bereits 2013 eine Strategie zur Anpassung an den Klimawandel formuliert, die 2018 evaluiert wurde und auf deren Grundlage 2021 eine neue Strategie veröffentlicht wurde. Drei Praxisbeispiele aus Spanien, Österreich und den Niederlanden zeigen, wie Anpassungsmaßnahmen auf nationaler Ebene umgesetzt werden. In Österreich war die Klimaanpassung stark fragmentiert und auf verschiedene Sektoren und gebietskörperschaftliche Ebenen verteilt.

Im zweiten Teil nutzt Preinfalk ein CGE-Modell, um die Anpassungsmaßnahmen in Österreich, den Niederlanden und Spanien zu bewerten, und zeigt den Nettonutzen der Anpassung selbst bei verbleibenden Schäden. Österreich hat 2012 seine erste Nationale Anpassungsstrategie (NAS) verabschiedet, die 2015 und 2017 aktualisiert und evaluiert wurde. Das Modell berücksichtigt öffentliche Anpassungsmaßnahmen in den Bereichen Land- und Forstwirtschaft, Hochwassergefahren durch Flüsse und ein Jahrhunderthochwasser. Die Ergebnisse der Studie zeigen für Österreich, dass öffentliche Anpassungsmaßnahmen die BIP-Verluste des Klimawandels im Jahr 2050 um insgesamt 83 Prozent reduzieren. Die Autorin untersucht auch die Folgen für die öffentlichen Finanzen. Ohne Anpassung würden die Abgabeneinnahmen aufgrund des Klimawandels um 2 Prozent niedriger ausfallen. Dieser Effekt kann durch Anpassungsmaßnahmen deutlich reduziert werden. Die höheren Einnahmen

reduzieren auch den Druck auf der Ausgabenseite, auch nach Berücksichtigung der öffentlichen Anpassungskosten, sodass der Rückgang bei den Transferleistungen an die privaten Haushalte um 63 Prozent reduziert werden kann. Es ist festzuhalten, dass auch in diesem Papier nur einzelne Teilbereiche von Anpassungen berücksichtigt werden.

Soziale Kosten und Wohlfahrtsverluste

Im Abschnitt 2.3 wurden bereits die sozialen Kosten des Kohlenstoffs im Kontext der allgemeinen ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels diskutiert. Im Folgenden soll näher darauf eingegangen werden, inwiefern Anpassungsmaßnahmen die klimabedingten Wohlfahrtsverluste, wie etwa Mortalität durch extreme Temperaturen, beeinflussen können.

Carleton et al. (2022) schätzen das Mortalitätsrisiko aufgrund des Klimawandels unter Verwendung von subnationalen Daten aus 40 Ländern. Die Autor:innen zeigen, dass die Mortalitätsraten im Zusammenhang mit sehr hohen (und sehr niedrigen) Temperaturen durch Anpassungsmaßnahmen erheblich reduziert werden können. Unter Verwendung eines „revealed-preference“-Ansatzes zur Ermittlung unbeobachteter Anpassungskosten kommen sie zu dem Schluss, dass die Kosten der Mortalität, einschließlich Anpassung, in einem Szenario mit hohen Emissionen im Jahr 2100 etwa 3,2 Prozent des globalen BIP ausmachen werden. Den Schätzungen zufolge würde der klimabedingte Anstieg der Mortalität im Jahr 2100 in einem Szenario mit hohen Emissionen zu 221 zusätzlichen Todesfällen pro 100.000 Einwohner:innen führen, wenn die positiven Effekte von Einkommenszuwächsen und Anpassungsmaßnahmen ausgeblendet werden, und zu 73 zusätzlichen Todesfällen pro 100.000 Menschen unter Berücksichtigung dieser beiden Aspekte. Die Studie errechnet mortalitätsspezifische soziale Kohlenstoffkosten (SCC) von 36,6 USD pro Tonne CO₂, die deutlich über früheren Schätzungen liegen. Für einkommensstarke Regionen fällt der Anstieg der Mortalität aufgrund ihrer besseren Anpassungsfähigkeit schwächer aus.

Kahn (2016) argumentiert, dass Marktmechanismen und Innovationen Anpassungsmaßnahmen effizienter machen können. So hat beispielsweise die weit verbreitete Einführung von Klimaanlage die Produktionskosten gesenkt und damit die hitzebedingte Sterblichkeit in den USA deutlich reduziert. In dem Papier wird auch argumentiert, dass ärmere Bevölkerungsschichten manche Anpassungsmaßnahmen schwerer finanzieren könnten.

Gouel und Laborde (2021) illustrieren die Rolle von marktbasierter Anpassungen an den Klimawandel anhand des internationalen Handels in der Landwirtschaft. Nach diesen Analysen wird ein Großteil der Länder von klimawandelbedingten Ertragsrückgängen betroffen sein, während manche Länder höhere Erträge sehen. Die klimabedingten Ertragsänderungen lösen in der Folge Preisreaktionen aus, die

Anpassungen in der Produktion und beim Handel induzieren und so die Wohlfahrtsverluste reduzieren können.

Kosten-Nutzen-Analysen

Kosten-Nutzen-Analysen sind ein Instrument, das den Aufwand (die Kosten) und das Ergebnis (den Nutzen) einer Aktion bzw. eines Investitionsprojekts vergleicht, und werden immer wieder in der Literatur zu Anpassungsmaßnahmen verwendet.

Feyen et al. (2020) quantifizieren u.a. den Nutzen von Flusshochwasseranpassungsmaßnahmen in Europa und kommen zu dem Ergebnis, dass Deichsysteme ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 2:1 bis 2,9:1 aufweisen und die wirtschaftlichen Schäden um 41 bis 68 Prozent reduzieren. Rückhalteräume bieten demnach noch höhere Erträge (bis zu 3,5:1) und reduzieren die Schäden um bis zu 82 Prozent. Maßnahmen zur Schadensbegrenzung an Gebäuden haben demnach in Europa ein Nutzen-Kosten-Verhältnis von 5,2:1. Die Autor:innen beziehen sich dabei auf eine Analyse von Dottori et al. (2020), die auch nationale Zahlen ausweist und für Österreich auf Nutzen-Kosten-Verhältnisse von Deichsystemen von 1,7:1 bis 2,2:1, von Rückhalteräumen von 2,3:1 bis 3,1:1 und von Schadensbegrenzungsmaßnahmen bei Gebäuden von 6,8:1 bis 7,3:1 kommen. Ohne Anpassung könnten die Schäden durch Flusshochwasser in der EU und in Großbritannien bis zum Jahr 2100 bei einer Erwärmung um 1,5 °C auf 24 Mrd. Euro (mit Anpassung 8,6 Mrd.) und bei einer Erwärmung um 3 °C auf knapp 50 Mrd. Euro (mit Anpassung 8,6 Mrd.) pro Jahr ansteigen.

Tröltzsch et al. (2012) entwickeln ein Instrumentarium für sektorenübergreifende Kosten-Nutzen-Analysen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel und wenden dieses auf verschiedene Fallbeispiele in Deutschland in mehreren Handlungsfeldern an, wobei der Schwerpunkt auf Maßnahmen der öffentlichen Hand oder an der Schnittstelle privat-öffentlich liegt. Auf diese Weise soll eine Grundlage geschaffen werden, um vorhandene Anpassungsmöglichkeiten zu priorisieren und geeignete Maßnahmen für die Umsetzung auszuwählen. Große Herausforderung dabei sind die unterschiedlichen Auswirkungen und verschiedenen vom Klimawandel betroffenen Handlungsfelder sowie die unterschiedliche zeitliche Dimension. Die Autor:innen unterteilen die untersuchten Maßnahmen nach der Zeitdimension und der Relevanz (diese drückt den Schutzgedanken von Bevölkerung und Infrastruktur aus) und stellen die klassifizierten Nutzen-Kosten-Verhältnisse dar, siehe Tabelle 2. Den Analysen zufolge zeigen sich sehr starke Unterschiede bei dieser Relation. In einem längerfristigen Zeithorizont weisen demnach Deicherhöhungen bei need-to-have und angepasste Pflanzensorten sowie Gebäudeschutz gegen Stürme gute Nutzen-Kosten-Verhältnisse auf, in der mittelfristigen Betrachtung insbesondere die Klimatisierung von Arbeitsräumen bei den nice-to-have-Maßnahmen. Kurzfristig haben demnach Hitzewarnsysteme, die Renaturierung von Auen, Informationen für Unternehmen, die

Beschneigung von Pisten sowie die vorsorgende Raumplanung beim Hochwasserschutz ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Datenlücken in Bezug auf Anpassungskosten und -effektivität stellen den Autor:innen zufolge aber nach wie vor ein großes Hindernis für die Analyse dar.

Tabelle 2: Nutzen-Kosten-Verhältnisse der in Tröltzsch et al. untersuchten Maßnahmen nach Relevanz und Zeitdimension

	Need-to-have (absolutes Schutzgut)	Need-to-have (Systemstabilität KRITIS)	Nice-to-have
heute	+ Hitzewarnsystem (80-500) +/- Bodenschutz (größer als 0.3) +/- Katastrophenschutzübungen +/- Katastrophenschutzpläne - Aufbau Naturschutzgebiete und Vernetzung (0.01-0.02) + Renaturierung Auen (1.2-3.4)	- Straßeninfrastruktur (0.9-7.5) 0 Kooperationslösung Staat-Versicherungswirtschaft	+ Information Unternehmen (1.26-15.3) + Beschneigung Pisten (28-114) +/- Wetterinfos Verkehr (1) +/- Diversifizierung Sommertourismus (0.4-3) +/- Kühlung therm. Kraftwerke (1.3-5) 0 Elementarschadensversicherung + Vors. Raumplanung (Hochwasserschutz) (2.4-4.4)
2050	+/- Grüne Dächer (0.7-1.4) +/- Frischluftschneisen (0.6-1.2) +/- Kühlung Krankenhäuser (0.4-2.7) - Klimatisierung Wohnbau (0.13-0.62)	- Schieneninfrastruktur (0.3-0.9)	+/- Kläranlagenanpassung an Niedrigwasser (0.78) + Klimatisierung Arbeitsräume (7.1) - Anpassung Stromleitungsnetz (0.01-0.24)
2080/2100	+ Deicherhöhung (2.5)		+ angepasste Pflanzensorten (max. 680) +/- Gebäudeschutz Stürme (1.3-5) Regenüberlaufbecken (0.33) Bewässerung Landwirtschaft (0.2-1)

+ gutes; +/- ausgeglichenes, - schlechtes Nutzen-Kosten-Verhältnis, 0: NKV konnte nicht berechnet werden.
Relevanz drückt den Schutzgedanken hinter der Maßnahme aus (need-to-have, kritische Infrastruktur, nice-to-have).

Quelle: Tröltzsch et al. (2012), Abbildung 15 • Erstellt mit Datawrapper

Nach Bellon et al. (2022) ist die Schätzung des Nutzens von Adaptierungen an den Klimawandel herausfordernd, aber es herrscht zunehmend Übereinstimmung darüber, dass dieser hoch sein kann. Sie zitieren Literatur, wonach das Nutzen-Kosten-Verhältnis für verschiedene Maßnahmen zwischen 1:1 und 9:1 liegt. Für das Jahr 2030 wird geschätzt, dass sich der weltweite öffentliche Anpassungsbedarf auf durchschnittlich 0,25 Prozent des globalen BIP pro Jahr beläuft. Für manche Entwicklungsstaaten können die Anpassungskosten 1 Prozent des BIP übersteigen. Kurzfristige Katastrophenschutz und langfristige Finanzplanung sind entscheidend, um makroökonomische Volatilität zu minimieren.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2011) stellt verschiedene Methoden der Bewertung von Anpassungsoptionen (Kosten-Nutzen-Analysen, Kosten-Wirksamkeits-Analysen und Multi-Kriterien-Analysen) vor und hebt deren Bedeutung hervor, um die am besten geeigneten Maßnahmen zur Verringerung der Anfälligkeit für Extremwetterereignisse und Stärkung der Resilienz zu ermitteln. Beispielsweise weist laut einer der zitierten Fallstudien der Hochwasserschutz in einer britischen Stadt ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (im Sinne des Gegenwartswerts der vermiedenen Schäden relativ zu den Kosten) von rund 5:1 auf, was seinen Wert in Hochrisikogebieten verdeutlicht.

3.2 Ökonometrische Untersuchungen in relevanten Themenfeldern

Empirische Untersuchungen zu einzelnen Teilaspekten von privaten Anpassungsmaßnahmen werden seit einigen Jahren durchgeführt. Untersuchte Bereiche sind insbesondere die Landwirtschaft, der Energieverbrauch und Migration. Für den Unternehmensbereich bestehen hingegen nur wenige Untersuchungen (siehe Fankhauser, 2017).

Landwirtschaft

Für den Bereich der Landwirtschaft liegen Ergebnisse vor allem hinsichtlich der Auswirkungen des Klimas auf die Anbauprodukte, Viehbestände und auf den Einsatz von Bewässerung in der Landwirtschaft vor. Seo und Mendelsohn (2008) gehen der Frage nach, inwiefern Temperatur und Niederschlagsintensität die landwirtschaftliche Produktion beeinflussen. In dem Papier wird auf südamerikanische landwirtschaftliche Betriebe abgestellt. Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass in kälteren Regionen eher Erdäpfel und Weizen, in milderen Regionen Mais, Sojabohnen und Reis und in wärmeren Regionen Obst und Gemüse angebaut werden. Auch nach der Niederschlagsintensität zeigen sich Unterschiede. Dies verdeutlicht, dass die Anbauprodukte an die klimatischen Verhältnisse angepasst werden. Bei Klimaänderungen ist ebenso davon auszugehen. Die Autor:innen gehen davon aus, dass die gefundenen Ergebnisse für zukünftige Klimaveränderungen unterschätzt sind, da neue Anbauprodukte und technologische Fortschritte nicht berücksichtigt werden.

Wang et al. (2010) finden ähnliche Anpassungsstrategien für die Landwirtschaft in China, wobei es jedoch Unterschiede in der Wahl der Nutzpflanzen und dem Ausmaß der Anpassung gibt. Die Autor:innen führen dies darauf zurück, dass einzelne Anbauprodukte auf einem Kontinent von größerer Bedeutung sind als anderswo. Dementsprechend ist auch für Europa davon auszugehen, dass Anpassungen bei Anbauprodukten von den Präferenzen am heimischen Markt abhängen. Die Wahl der Anbauprodukte hängt nicht nur von den durchschnittlichen regionalen Klimaverhältnissen ab, sondern auch von den Veränderungen des saisonalen Klimas.

Eine weitere Einflussgröße auf die landwirtschaftliche Produktion ist die Möglichkeit der Bewässerung. Kurukulasuriya et al. (2011) untersuchen, wie klimatische Bedingungen die Verwendung von Bewässerungsmethoden beeinflussen. Der empirischen Evidenz nach ist die Wahl von Bewässerung von der Temperatur und der Niederschlagsintensität abhängig. Es zeigt sich darüber hinaus eine unterschiedliche klimatische Sensitivität, je nachdem ob Bewässerung verwendet wird oder nicht. Anpassungen in der Landwirtschaft infolge von klimatischen Veränderungen können nach den Ergebnissen der Literatur sowohl technologisch als auch über die Wahl der Anbauprodukte erfolgen.

Anpassungen sind auch in der Zusammensetzung des Viehbestandes zu erwarten. Seo et al. (2010) untersuchen die Zusammensetzung in Südamerika basierend auf unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen. Für ein heißes und trockenes CCC-Szenario⁵ gehen die Autor:innen, basierend auf den empirischen Ergebnissen davon aus, dass der Anteil des Rinderbestandes um etwa 5,5 Prozentpunkte zurückgeht, der Anteil von Schafen mit 7 Prozentpunkten hingegen deutlich zunimmt.

Raumklima und Energie

Eine weitere wesentliche Anpassungsmaßnahme an die Klimaerwärmung ist die Steuerung des Raumklimas. Raumkühlung ist eine wichtige Maßnahme, um die Mortalität zu reduzieren und die Produktivität zu erhöhen. Nach Barreca et al. (2016) hat der verbreitete Einsatz von Klimaanlage in den USA die Mortalität an heißen Tagen zwischen der ersten und zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts um rund 80 Prozent reduziert. Die Literatur zum Raumklima beschäftigt sich weitgehend mit der Nachfrage nach Elektrizität bzw. Energie von privaten Haushalten. Im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung wird davon ausgegangen, dass die Nachfrage nach Heizenergie im Gefolge wärmerer Winter zurückgeht, die Nachfrage nach Kühlung jedoch erheblich zunimmt (siehe beispielsweise Auffhammer, 2022). Mit dem Anstieg der Nachfrage nach Kühlung ist ein Anstieg der Nachfrage nach elektrischer Energie verbunden. In der Literatur haben sich mehrere Papiere mit der Frage auseinandergesetzt, in welchem Umfang der Energieverbrauch in der Zukunft zulegen könnte.

Franco und Sanstad (2008) verwenden stundenweise Daten zum Stromverbrauch in Kalifornien im Jahr 2004 und beziehen diese auf die bevölkerungsgewichtete Temperatur. Nach der Schätzung nimmt der Stromverbrauch überproportional mit der Temperatur zu, mit einem Nachfrageanstieg bis zu 20,3 Prozent und einem Anstieg der Spitzenlast von 19,3 Prozent in einem Klimaszenario mit weiterhin hohen CO₂-Emissionen. Auffhammer et al. (2017) kommt auf Basis von hochfrequenten Daten ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die Spitzenlast bis zum Ende des Jahrhunderts um 15 bis 21 Prozent zulegt und die Häufigkeit des Eintretens der Spitzenlast um den Faktor 12 bis 15 zunimmt.

Deschenes und Greenstone (2011) verwenden als Erste Paneldaten zur Quantifizierung des Einflusses der Temperatur auf die Sterblichkeit und den Energieverbrauch. Als Grundlage dienen tägliche Wetterdaten. Sie finden einen U-förmigen Zusammenhang sowohl zwischen Temperatur und Sterblichkeit als auch zwischen Temperatur und Energieverbrauch. Dies bedeutet, dass kalte und heiße Tage die Sterblichkeit und den Energieverbrauch erhöhen. Den Ergebnissen nach führt die Klimaerwärmung für die Jahre 2070 bis 2099 zu einem durchschnittlichen Anstieg des Energieverbrauchs um rund 11 Prozent, wobei eine Dämpfung des Energieverbrauchs infolge der geringeren Anzahl an

⁵ Szenario des Canadian Climate Center, publiziert in Boer et al. (2000).

sehr kalten Tagen berücksichtigt wird. Aroonruengsawat und Auffhammer (2012) untersuchen die Auswirkungen auf den Stromverbrauch in Kalifornien mit dem Ergebnis, dass dieser bis zum Ende des Jahrhunderts um 1 bis 6 Prozent zulegt. Dabei zeigen sich erhebliche regionale Unterschiede im Verbrauch bei heißen Tagen.

Sowohl Deschenes und Greenstone als auch Aroonruengsawat und Auffhammer gehen von einer, von klimatischen Veränderungen unabhängigen, Energie- bzw. Elektrizitätsnachfrage aus. Dies bedeutet, dass zwar berücksichtigt wird, dass mit einer größeren Anzahl an heißen Tagen der Stromverbrauch in jenen Haushalten mit Klimaanlage zunimmt, jedoch die Verbreitung von Klimaanlage unverändert bleibt. Diese Verhaltensreaktion wird als *intensive Margin* bezeichnet. Die *extensive Margin* berücksichtigt darüber hinaus auch noch die stärkere Verbreitung von Klimaanlage im Zuge des Klimawandels. Auffhammer (2022) untersucht die langfristigen klimabedingten Auswirkungen auf die Elektrizitäts- und Erdgasnachfrage von privaten Haushalten und berücksichtigt die intensive und die extensive Margin. Dabei werden wiederum Informationen von kalifornischen privaten Haushalten verwendet. Den Schätzergebnissen nach zeigt sich wiederum ein U-förmiger Verlauf der Nachfrage nach elektrischer Energie in Abhängigkeit von der Temperatur. Basierend auf diesen Ergebnissen würde im Zeitraum 2080 bis zum Ende des Jahrhunderts der Stromverbrauch in Kalifornien um rund 3 Prozent im RCP4.5 bzw. um knapp 13 Prozent im RCP8.5 Szenario zulegen. Davon entfallen knapp 1 Prozent bzw. 5 Prozent auf die intensive Margin und der Rest auf die extensive Margin. Der Gasverbrauch würde dagegen um 11 (RCP4.5) bzw. 19,5 Prozent (RCP8.5) zurückgehen. Nach dem Autor würde der Anstieg im Stromverbrauch von geringerer Erdgasnachfrage kompensiert.

(Binnen-)Migration

Eine weiteres Anpassungsverhalten, welches in der Literatur diskutiert wird, ist die Migration im Gefolge der Klimaerwärmung. Im Stern Review (2007) wurde bereits festgehalten, dass die globalen Konsequenzen des Klimawandels ein koordiniertes internationales Vorgehen erfordern und Entwicklungsländer besonders betroffen sind. Dies wurde auch im ersten IPCC-Bericht der UNO hervorgehoben, wobei von 200 Mio. Klimaflüchtlingen bis 2050 ausgegangen wurde. Im Zentrum steht daher in den ökonomischen Untersuchungen häufig die Migration aus Entwicklungsländern in entwickelte Länder. Beine und Parsons (2015) verwenden Paneldaten zu Naturkatastrophen und langfristigen klimatischen Gegebenheiten und untersuchen den Einfluss auf bilaterale Migrationsströme von 1960 bis zum Jahr 2000. Sie finden keinen direkten Effekt der langfristigen klimatischen Verhältnisse auf internationale Migrationsströme, jedoch Evidenz für einen indirekten Effekt über Einkommensunterschiede. Eine Vergrößerung der Einkommensdifferenz zwischen Ländern aufgrund unterschiedlicher Betroffenheit durch den Klimawandel würde damit zu höherer Migration führen. Das

Papier zeigt auch, dass Naturkatastrophen zu einer stärkeren Binnenmigration in Städte führen. Dies entspricht der Erwartung des UK Government Office for Science, das im Jahr 2011 festgehalten hat, dass es schwierig ist Migrant:innen dahingehend zu differenzieren, inwiefern Umweltfaktoren der einzige Migrationsgrund sind (Beine und Parsons, 2015). Zu einem vergleichbaren Ergebnis kommen Cattaneo und Peri (2016). Beine und Parsons (2017) untersuchen die Auswirkungen von Naturkatastrophen und finden, dass diese zu einer niedrigeren Auswanderung insgesamt führen, jedoch zu einem Anstieg in die Nachbarländer der Migrant:innen. Nach der Interpretation der Autor:innen wirken die finanziellen Restriktionen in diesem Fall stärker als der Wunsch nach Migration. Für Länder mit mittlerem Einkommen forcieren Naturkatastrophen die Migration in Länder, mit welchen in der Vergangenheit eine koloniale Beziehung bestand. Nach Gröger und Zylberberg (2016) ist Binnenmigration in städtische Gebiete nach einer Naturkatastrophe mit hohen Einkommensverlusten eine wichtige Reaktion.

In einer Metaanalyse zeigen Beine und Jeusette (2021), dass die Wahrscheinlichkeit, einen positiven Zusammenhang zwischen klimatischen Voraussetzungen und Migration zu erhalten, von der Art der Daten, vom Maß für die Mobilität, von der ökonometrischen Methode und dem Indikator für das Klima abhängt. Insgesamt zeigt aber, dass im Zusammenhang mit dem Klimawandel von stärkeren Migrationsbewegungen auszugehen sein wird. Darüber hinaus zeigt sich insbesondere für Entwicklungsländer ein stärkerer positiver Konnex zu Wanderungsbewegungen aufgrund klimatischer Verhältnisse. Die Literatur bietet zwar einen Überblick darüber, wie Europa in Zukunft von Migrationsbewegungen betroffen sein könnte, bietet aber wenig Hinweise darauf, inwieweit Migration innerhalb Europas ein Faktor sein könnte, um sich an klimatische Veränderungen anzupassen.

Feng et al. (2012) gehen der Frage nach, wie die landwirtschaftliche Produktivität in den USA die Binnenmigration beeinflusst. Sie konzentrieren sich dabei auf die ländlichen Gebiete des Corn Belts und finden eine Semielastizität um $-0,17$. Dies würde bedeuten, dass eine 1-prozentige Verringerung der Ernteerträge zu einer Verringerung der Bevölkerung durch Wanderung von 0,17 Prozent führt. Der Effekt ist hauptsächlich auf junge Erwachsene zurückzuführen. Basierend auf einem Klimaszenario kommen die Autor:innen zu dem Ergebnis, dass der Klimawandel die erwachsene Bevölkerung in den ländlichen Gebieten auf mittlere Frist (2020 bis 2049) um 3,7 Prozent reduziert. Für den weiteren Zeitraum kann der Effekt noch deutlich stärker ausfallen. Darüber hinaus ist der Effekt in besonderem Maße nichtlinear. Bei einer Temperaturerhöhung um 1 °C würde auf Grundlage der empirischen Ergebnisse rund 0,6 Prozent der Bevölkerung abwandern, bei 5 °C 9,3 Prozent. Hornbeck (2012) untersuchen die Folgen der Staubstürme und Dürre in der Dust Bowl in den USA in den 1930er Jahren und die Folgen für die Binnenmigration bis in die 1950er Jahre. Die Bevölkerung ist zwischen 1930 und 1940 in den besonders betroffenen Gebieten gegenüber weniger betroffenen Gebieten der Dust Bowl um 12 Prozent

zurückgegangen, gegenüber den durchschnittlich betroffenen Gebieten um 9 Prozent. Diese Entwicklung hat noch bis in die 1950er und 1960er Jahre angehalten, sodass die Bevölkerung aufgrund der Betroffenheit schlussendlich um über 25 Prozent geringer war. Jennings und Gray (2015) verwenden Bevölkerungsdaten über die Niederlande für den Zeitraum 1865 bis 1937. Nach der Schätzung sind negative klimatische Bedingungen mit höherer Binnenmigration verbunden.

Die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Migration lässt sich aus der Vergangenheit nur sehr bedingt ableiten, da das Ausmaß sehr stark von gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängt. Auf Grundlage der empirischen Ergebnisse lässt sich aber eine verstärkte Migration aus Entwicklungsländern nach Europa erwarten, aber auch eine Zunahme der Binnenmigration aus besonders betroffenen Gebieten. Dabei mag die Niederlassungsfreiheit in der EU dazu führen, dass es auch verstärkt zu Migration zwischen den EU-Mitgliedstaaten kommt.

Innovationen

Ein weiterer wesentlicher Treiber von Anpassungen sind Innovationen, um Klimaveränderungen und damit im Zusammenhang stehenden Extremwetterereignissen besser widerstehen zu können. Technologische Innovationen sind eine wichtige Form der Anpassung, da sie die Hilfsmittel bieten, damit sich Personen und Unternehmen an den Wandel anpassen können. Nach der UNFCC (2006) sind in einigen Fällen die Anpassungen lediglich Verhaltensveränderungen, in anderen Fällen ist der Einsatz von Technologien notwendig, sei es in tangibler (beispielsweise Infrastruktur) oder in intangibler Form (beispielsweise Wissenschaft, Know-How, Fertigkeiten).

Dieser Aspekt ist aus der Vergangenheit besonders schwierig abzuschätzen und mit entsprechender Unsicherheit verbunden. Die Literatur kann jedoch einen Hinweis darauf geben, inwiefern mit höheren Innovationsanstrengungen im Gefolge der Klimaerwärmung zu rechnen ist. Miao und Popp (2014) gehen der Frage nach, ob Naturereignisse technische Innovationen befördern. Die Autor:innen ziehen dabei drei mögliche Naturereignisse heran, Hochwasser, Dürren und Erdbeben, und verbinden diese mit entsprechenden Vermeidungstechnologien, wie Hochwasserschutz, dürreresistenten Nutzpflanzen und erdbebensicheren Gebäuden. Sie verwenden Paneldaten über 28 entwickelte Länder und einen Zeitraum von 25 Jahren. Sie zeigen, dass alle drei Formen von Naturereignissen mit einem Anstieg der Patentanmeldungen für entsprechende Technologien verbunden sind. Es zeigt sich auch, dass die Innovationstätigkeit im Falle von Hochwasser auch dann zunimmt, wenn die Katastrophe in einem anderen Land stattgefunden hat. Bei Patenten im Bereich des Angebots an Wasser und der Wassereffizienz zeigt sich ein etwas anderes Bild. So stammen 80 Prozent dieser Patente aus Ländern mit geringer oder moderater Wasserknappheit. Länder mit hoher bzw. chronischer Wasserknappheit

konzentrieren sich auf Technologien zur Steigerung der Effizienz bezüglich des Wasserangebots (Conway et al., 2015).

Giudici et al. (2017) untersuchen Einflussgrößen auf die Gründung von Startups im Cleantech-Bereich in Italien. Mit einem Anteil von rund 14 Prozent an allen innovativen Startups spielen diese eine wichtige Rolle. Die Autor:innen finden mehrere relevante Einflussfaktoren, die für die Anzahl dieser Unternehmen im positiven Sinne relevant sind. Dazu gehört eine diversifizierte sektorale Struktur der Unternehmen, eine große Anzahl etablierter Unternehmen, große urbane Ballungsräume, die Nähe zu einer technischen Universität, bestehende Patente und das lokale Bewusstsein der Politik für Umweltbelange⁶. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass Umweltkatastrophen, die durch menschliche Aktivitäten verursacht werden, einen positiven Einfluss auf die Gründung von Cleantech-Startups aufweisen.

Die Daten zu Innovationen zeigen, dass die Anzahl der Patente im Bereich der Klimaanpassungen⁷ zwischen 1995 und 2015 zwar jährlich um 6,7 Prozent gewachsen sind, aber damit nur geringfügig schneller als Patentanmeldungen über alle Bereiche mit 5,6 Prozent. Im Gegensatz dazu haben Patente bezüglich der Vermeidung des Klimawandels um 10,9 Prozent zugelegt und damit deutlich stärker (siehe Dechezlepretre et al., 2020). Die Patentanmeldungen für Anpassungsmaßnahmen sind darüber hinaus sehr stark auf eine beschränkte Zahl von Ländern konzentriert (China, Deutschland, Japan, Südkorea und die USA). Es zeigt sich auch, dass nur eine geringe Zahl von Anpassungsinnovationen über Ländergrenzen hinweg transferiert werden, insbesondere nicht in Entwicklungsländer (ebda.).

⁶ Bemessen an umgesetzten öffentlichen Umweltmaßnahmen.

⁷ Die Autor:innen berücksichtigen Patente nur dann, wenn sie in mehr als in einem Land angemeldet wurden und folgende Bereiche umfassen: Küsten- und Gewässerschutz, Wasserwirtschaft, Infrastruktur, Landwirtschaft, Gesundheit und Indirekte Anpassungen.

4. SZENARIENANALYSE VON ANPASSUNGSMABNAHMEN

Der vorangegangene Abschnitt behandelte Untersuchungen zu den positiven Folgewirkungen von Anpassungsmaßnahmen, insbesondere in bestimmten volkswirtschaftlichen Sektoren. Diese bieten einen guten Überblick darüber, wie Anpassungen in einzelnen Teilbereichen aussehen können. Um ein umfangreicheres Bild zu den Anpassungsmaßnahmen zu erhalten, ist aber eine breitere Perspektive notwendig. Anpassungsschritte werden nicht nur von öffentlicher Seite gesetzt, sondern auch private Akteure setzen autonom Maßnahmen, um die Folgen abzufedern. Dabei sind diese autonomen Entscheidungen von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu gehören die vorliegende Informationsmenge, Marktanreize und politische Signale (siehe Fankhauser, 2017). Diese Vielzahl an Maßnahmen ist in diesen Untersuchungen, wie Kosten-Nutzen Analysen, kaum zu integrieren und zu berücksichtigen. Daher wird an dieser Stelle ein anderer Ansatz gewählt, um ein umfangreicheres Bild der ökonomischen Folgen von Anpassungsmaßnahmen, öffentlich wie privat, zu erhalten.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung geht es um die Frage der makroökonomischen Wirkungen von Adaptionsmaßnahmen. Dabei sind nicht nur die Folgen für die Wertschöpfung von Interesse, sondern auch die Folgen für den Arbeitsmarkt, die Investitionstätigkeit und die Einkommen der privaten Haushalte. Die Untersuchung erfolgt im Rahmen einer Mischung einer ökonometrischen und einer makroökonomischen Simulationsanalyse. Auf Grundlage einer ökonometrischen Schätzung hinsichtlich der Wertschöpfungseffekte von Anpassungsmaßnahmen erfolgt im Makromodell PuMA eine Analyse der weiteren ökonomischen Wirkungen, die Zusammenhänge zwischen den Handlungen der ökonomischen Akteure widerspiegelt. Es werden die Ergebnisse zweier Klimaszenarien verwendet und das wirtschaftliche Potenzial von Anpassungsmaßnahmen abgeschätzt. Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der Probleme bei der Abschätzbarkeit sehr langer Zeiträume und der Unsicherheit der Auswirkungen der Klimafolgen und der entsprechenden Anpassungsmaßnahmen die nachfolgenden Ergebnisse nur als Abschätzung gesehen werden können.

4.1 Simulationsdesign

Die in der vorliegenden Studie durchgeführte Szenarienrechnung der volkswirtschaftlichen Effekte von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel basiert auf der Studie von Gourio und Fries (2020), die die ökonomischen Auswirkungen heißer Tage auf regionaler Ebene in den USA analysieren. Diese Untersuchung beschäftigt sich mit den gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Summe aller Anpassungsmaßnahmen, wobei nicht auf einzelne Maßnahmen abgestellt wird, sondern aus den aggregierten Auswirkungen auf die positiven Effekte von privaten und öffentlichen

Anpassungsmaßnahmen geschlossen wird. Ausgangspunkt der Autor:innen ist die Beobachtung, dass das Einkommen bzw. die Wirtschaftsleistung in verschiedenen Regionen der USA unterschiedlich stark auf heiße Temperaturen reagieren. Während demnach die Wirtschaftsleistung in warmen Regionen, also insbesondere im Süden, in schwächerem Ausmaß von einem Hitzetag beeinflusst wird, sind die wirtschaftlichen Einbußen eines Hitzetags in kühleren Regionen deutlich stärker. Die Autor:innen argumentieren, dass diese unterschiedlichen Ergebnisse auf Anpassungsmaßnahmen zurückgeführt werden können. Während im Süden schon jetzt eine Reihe von Maßnahmen umgesetzt wurden, die die Auswirkungen heißer Tage reduzieren, rentieren sich derartige Maßnahmen im kühleren Norden (noch) nicht, und die Auswirkungen von Hitzetagen sind dementsprechend stärker – obwohl die Technologien für Anpassungen eigentlich schon vorhanden wären.

Auf Basis dieser Informationen entwickeln die Autor:innen in der Folge ein ökonomisches Modell und simulieren verschiedene Klimawandelszenarien aus Projektionen von Rasmussen et al. (2016).⁸ Sie analysieren einerseits ein Szenario mit konstant gehaltenen (und dementsprechend geringen) und andererseits ein Szenario mit optimalen (und dementsprechend stärkeren) Anpassungsmaßnahmen. Die Differenz zwischen diesen beiden Szenarien verdeutlicht, inwieweit diese Adaptierungsmaßnahmen die negativen wirtschaftlichen Auswirkungen der Erwärmung reduzieren können.⁹ Die Simulationsergebnisse von Gourio und Fries (2020) sind in Tabelle 3 dargestellt. Im mittleren County reduziert demnach der Klimawandel im RCP4.5-Szenario langfristig den privaten Konsum um 2,3 Prozent ohne weitere und um 1,5 Prozent mit neuen Anpassungsmaßnahmen, der Effekt der Anpassungsmaßnahmen beträgt demnach 0,8 Prozent. Im RCP8.5-Szenario beträgt der Effekt der Anpassung 3,7 Prozent, Adaptierungsmaßnahmen werden also nach dem Modell umso relevanter und wirken den Klimaeffekten umso kräftiger entgegen, je stärker der Klimawandel ausfällt.

⁸ Die Studie verwendet dementsprechend einen datengetriebenen, ganzheitlichen Ansatz zur Bestimmung der Auswirkungen der Temperatur auf die Wirtschaftsleistung insgesamt. Eine Untersuchung der konkreten Kanäle, wie hohe Temperaturen auf die Einkommen wirken, ist für diese Analyse nicht notwendig und wird auch nicht vorgenommen.

⁹ Daraus ergibt sich auch eine gewisse Einschränkung: die Methode ermöglicht, aktuell verfügbare Anpassungsmaßnahmen zu analysieren, zukünftig verfügbare Technologien sind nicht abgedeckt.

Tabelle 3: Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen in Gourio und Fries (2020)

Gourio und Fries (2020)	Temperaturanstieg 2080-99 zu 1981-2010 in °C in den USA	Konsum ohne weitere Anpassungsmaßnahmen	Konsum bei Anpassungsmaßnahmen	Effekt von Anpassungsmaßnahmen
RCP4.5	2,4	-2,3%	-1,5%	0,8%
RCP8.5	5,2	-6,2%	-2,7%	3,7%

Werte beziehen sich auf den Median der Counties.

Erstellt mit Datawrapper

ECO AUSTRIA
INSTITUT FÜR
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Um die wirtschaftlichen Auswirkungen von Anpassungen an den Klimawandel für Österreich zu untersuchen, wird das Makromodell E-PuMA herangezogen. Das Modell ist eine Erweiterung des PuMA-Modells, welches die Bevölkerungsstruktur, den Unternehmensbereich, den Arbeitsmarkt und den öffentlichen Sektor detailliert abbildet und regelmäßig bei EcoAustria für die Analyse von Reformmaßnahmen bzw. strukturellen Entwicklungen verwendet wird. Durch die E-PuMA-Erweiterung werden auch der Energiebereich mit Angebot und Nachfrage von Energieträgern sowie Treibhausgasemissionen explizit modelliert.¹⁰

Basis für die Modellsimulation ist zudem das Projekt „ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich“, in dem ZAMG, WEGC und Z_GIS¹¹ eine Analyse des Klimas in Österreich in zwei Treibhausgaszenarien – einem Klimaschutz- (RCP4.5) und einem „business-as-usual“-Szenario (RCP8.5) – durchführen (siehe Chimani et al., 2016). Für die beiden Klimaszenarien wurden die Ergebnisse von 13 Modellen zusammengefasst. Demnach ergibt sich in der „nahen Zukunft“ (2021-2050) in beiden Szenarien ein ähnlich starker Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur um 1,3 °C bzw. 1,4 °C im Vergleich zur Periode 1971-2000, für die „ferne Zukunft“ (2071-2100) wird im RCP8.5-Szenario mit österreichweit 4 °C ein wesentlich stärkerer Temperaturanstieg als im RCP4.5-Szenario (2,3 °C) erwartet. In beiden Szenarien stimmen alle Modelle darin überein, dass die mittlere Temperatur signifikant zunehmen wird, der Temperaturanstieg streut zwischen den Modellen zwischen 1,8 °C und 3,5 °C im langfristigen RCP4.5-Szenario. Nach diesen Analysen ist der Anstieg im Winter sowie im Westen und Süden etwas überdurchschnittlich ausgeprägt. Zudem wird in beiden Szenarien ein spürbarer Anstieg von Hitzetagen prognostiziert.¹²

¹⁰ Berger und Strohner (2020) liefern eine ausführliche Dokumentation des PuMA-Modells, die Erweiterungen um die Bereiche Energie und Klima sind in Berger und Strohner (2022) beschrieben. Eine kurze Beschreibung des Modells findet sich im Appendix.

¹¹ Zentralanstalt für Meteorologie, und Geodynamik, Wegener Center für Klima und Globalen Wandel der Universität Graz und der Interfakultäre Fachbereich für Geoinformatik – Z_GIS der Paris Lodron Universität Salzburg.

¹² Weil Niederschläge eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität aufweisen, ergeben sich für die Niederschlagsmengen weniger zuverlässige Aussagen. Während die Modelle in der nahen Zukunft keine signifikante Änderung der Niederschlagsmengen sehen, ergibt sich in der fernen Zukunft im Mittel über die Modelle und im Österreichschnitt ein Anstieg der Jahresmenge an Niederschlag um 7 Prozent, vor allem im Winter nehmen die Niederschläge zu.

Auf Grundlage der Arbeit von Gourio und Fries (2020) über die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen in den USA und die prognostizierte Jahresdurchschnittstemperatur in Österreich werden in der Folge vier verschiedene Modellszenarien analysiert, nämlich jeweils die Ergebnisse in der „nahen Zukunft“ (2021-2050) bzw. in der „fernen Zukunft“ (2071-2100), sowohl für das RCP4.5- als auch für das RCP8.5-Szenario.

Gourio und Fries (2020) untersuchen in ihrer Studie nicht die konkreten Maßnahmen bzw. Wirkungskanäle der Anpassung an heißere Temperaturen (wie etwa Klimaanlage bzw. Hitzeschutz in Büros und Produktionsstätten, hitzeresistentere Pflanzen oder Anlagen und Infrastruktur, die höheren Temperaturen standhalten). Vielmehr nehmen sie eine ganzheitliche bzw. makroökonomische Betrachtung ein und untersuchen die Folgen für das Gesamteinkommen. Nachdem sie nicht nach den Wirkungskanälen und Maßnahmen differenzieren, können diese auch nicht aus der Studie abgeleitet werden.

Bei der Untersuchung mit dem E-PuMA-Modell werden die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen daher über mehrere Kanäle abgebildet, nämlich zum einen über eine geringere Abschreibung des Kapitalstocks (geringere Schäden) und zum anderen über eine höhere Produktivität. Die Veränderung der Abschreibungsrate des Kapitals wird auf Basis der Untersuchung von Steininger et al. (2020) vorgenommen. In dieser Studie werden für Österreich verschiedene Schäden des Klimawandels in einem Szenario abgeschätzt, in welchem die Temperatur global bis 2050 um nicht mehr als 2 °C zunimmt. Im Schnitt ergeben sich zunehmende jährliche Schäden durch Fluss-Hochwasser. Im Jahr 2030 sollen die Kosten bei 1,7-2 Mrd. Euro und im Jahr 2050 bei 2,5-3,3 Mrd. Euro liegen. Diese Zahlen werden hier in Relation zu den Gesamtkosten laut Gourio und Fries gesetzt und diese Relation in der Modellsimulation angewendet. Als zweiter wesentlicher Wirkungskanal wird eine höhere Produktivität modelliert. Dabei wird unterstellt, dass zwei Drittel des Produktivitätsanstiegs „labour-augmented“ erfolgt, womit in der Produktionstätigkeit der Beschäftigungsinput produktiver wird, sich die Produktivität des Kapitalstocks aber nicht direkt verändert, während ein Drittel als Anstieg der Gesamtfaktorproduktivität implementiert wird.

Bei der Szenarienanalyse ist zu beachten, dass die Ergebnisse von Gourio und Fries (2020) für die Modellsimulation schon „Netto“, das heißt abzüglich der Kosten bzw. des Aufwands für die Anpassungsmaßnahmen interpretiert werden. Betrachtet werden also „Nettoeffekte“, das heißt, der private Konsum bzw. die Wertschöpfung ohne Kosten für die Anpassungsmaßnahmen.¹³

¹³ Schlagen sich diese Kosten nachfrageseitig in der Ökonomie durch und erhöhen die Wertschöpfung, dann sind sie jedoch berücksichtigt.

4.2 Ergebnisse der Simulationsszenarien

Die wirtschaftlichen Effekte von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf Basis der beschriebenen Methode in den vier Simulationsszenarien sind in Tabelle 4 dargestellt. Ein wesentlicher Wirkungskanal sind die höhere Gesamtfaktorproduktivität bzw. die höhere Arbeitsproduktivität der Beschäftigten, etwa weil durch Klimaanlage oder bauliche Maßnahmen die Produktivität der Beschäftigten auch bei Hitzetagen erhalten bleibt oder weil Pflanzen, Anlagen und Infrastruktur resistenter gegenüber den klimatischen Veränderungen werden. Damit steigt der Output eines Beschäftigungsverhältnisses zwischen Arbeitnehmer:in und Unternehmen, worüber im Rahmen der Gehaltsabschlüsse verhandelt wird. So profitieren die Beschäftigten von höheren realen Einkommen und die Unternehmen von niedrigeren Lohnstückkosten. Betrachtet man das Szenario mit der stärksten Erwärmung, also das RCP8.5-Szenario in der „fernen Zukunft“ in der letzten Spalte von Tabelle 4, so fallen der Modellsimulation zufolge die realen Nettolöhne im Szenario mit Anpassungsmaßnahmen um durchschnittlich 2,1 Prozent höher aus als im Basisszenario ohne Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.¹⁴ Bezieht man diesen Anstieg auf ein aktuelles Nettojahreseinkommen eines/r ganzjährig Vollzeit Beschäftigten, so entspricht dies einem Einkommenszuwachs in der Höhe von 880 Euro. Weil in den anderen untersuchten Szenarien die Kosten des Klimawandels und damit auch die Adaptierungsmaßnahmen ein geringeres Ausmaß annehmen, sind die volkswirtschaftlichen Effekte entsprechend geringer. Beispielsweise beträgt der anpassungsbedingte Einkommenszuwachs im langfristigen RCP4.5-Szenario gut 0,7 Prozent. In den kurzfristigen Szenarien ist mit moderateren Ergebnissen zu rechnen.

Die Anpassungsmaßnahmen haben in den verschiedenen Szenarien auch einen signifikanten Beschäftigungseffekt zur Folge. Weil sie die Produktivität der Beschäftigten stärken und damit die Lohnstückkostenentwicklung dämpfen, nimmt die Arbeitsnachfrage der Unternehmen deutlich zu. Umgekehrt stärken die höheren Erwerbseinkommen das Arbeitsangebot der privaten Haushalte insbesondere in Form einer stärkeren Partizipation am Arbeitsmarkt sowie von intensiveren Suchanstrengungen bei Vorliegen von Arbeitslosigkeit. Nach der Modellsimulation stärken die Anpassungsmaßnahmen die Beschäftigung im stärksten Klimawandel-Szenario um 0,6 Prozent, was 26.000 zusätzlich Beschäftigten entspricht. Der Beschäftigungseffekt ist gemäß der Modellsimulation vergleichsweise gleichmäßig auf die drei Bildungsgruppen verteilt.

¹⁴ Die dargestellten Auswirkungen sind jeweils als Niveauabweichung im Vergleich zum Basisszenario zu verstehen. Das Reformszenario unterscheidet sich vom Basisszenario nur dadurch, dass Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel abgebildet sind. Dementsprechend lassen sich die Ergebnisse als kausale Effekte der Anpassungsmaßnahmen interpretieren.

Die positiven Beschäftigungseffekte sind zum einen auf eine stärkere Partizipation am Arbeitsmarkt zurückzuführen und zum anderen auf eine niedrigere Arbeitslosigkeit. Nach der Modellsimulation reduzieren die geringeren Auswirkungen des Klimawandels infolge der Anpassungen die Arbeitslosenquote im langfristigen RCP8.5-Szenario um knapp 0,3 Prozentpunkte, was einer Reduktion der Zahl der Arbeitslosen um 13.000 Personen entspricht. Dementsprechend macht dieser Rückgang der Arbeitslosigkeit rund die Hälfte des Beschäftigungszuwachses aus. Wie bei der Beschäftigung zeigen sich auch bei der Arbeitslosigkeit keine spezifischen Qualifikationseffekte.

Durch den Anstieg der realen Durchschnittseinkommen und die positiven Beschäftigungseffekte kräftigen die Anpassungsmaßnahmen das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte. Die Folge davon ist eine deutliche Ausweitung des privaten Konsums. Nach der Modellsimulation legt dieser langfristig im RCP8.5-Szenario um knapp 2,2 Prozent und im RCP4.5-Szenario um knapp 0,8 Prozent stärker zu als wenn keine weiteren Anpassungsmaßnahmen durchgeführt würden. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang wie bereits erwähnt, dass Gourio und Fries (2020) in der Modellsimulation „Nettoeffekte“ ermitteln, die bereits Ausgaben für Adaptierungsmaßnahmen berücksichtigen.

Bei den Investitionen der Unternehmen sind zwei gegenläufige Wirkungskanäle von Bedeutung. Einerseits stärken die zusätzliche Produktivität und die zusätzliche Beschäftigung die Ertragslage der Unternehmen bzw. die Ertragsrate von Investitionen. Als Folge davon erhöhen die Unternehmen ihre Investitionstätigkeit und erweitern damit den Kapitalstock. Andererseits reduzieren die Anpassungsmaßnahmen die Schäden durch z.B. Fluss-Hochwasser bzw., ökonomisch gesprochen, die Abschreibung des Kapitalstocks. Dementsprechend besteht durch diese Maßnahmen eine geringere Notwendigkeit für Ersatzinvestitionen für beschädigten bzw. zerstörten Kapitalstock. Wie in Tabelle 4 ersichtlich, überwiegt der Modellsimulation zufolge in der langen Frist der zweite, investitionsdämpfende Kanal, und die Investitionen fallen im RCP8.5-Szenario mit Anpassungsmaßnahmen um 0,4 Prozent geringer aus als ohne Adaptierungen. Dennoch nimmt der in den Unternehmen eingesetzte Kapitalstock aufgrund der geringeren Abschreibung bzw. Schäden deutlich zu. In der nahen Zukunft ist gemäß Modellsimulationen jedoch der Wirkungskanal der höheren Erträge relevanter und die privaten Investitionen nehmen geringfügig zu.

Tabelle 4: Volkswirtschaftliche Auswirkungen von Anpassungen an den Klimawandel

	nahe Zukunft (2021-2050)	nahe Zukunft (2021-2050)	ferne Zukunft (2071-2100)	ferne Zukunft (2071-2100)
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur relativ zu 1971-2000 (in Grad)	1,3	1,4	2,3	4,0
BIP, real	0,20%	0,32%	0,94%	2,66%
Investitionen, real	0,15%	0,23%	-0,11%	-0,38%
Privater Konsum, real	0,14%	0,22%	0,76%	2,16%
Nettoeinkommen je Stunde, real	0,15%	0,23%	0,74%	2,08%
Beschäftigung	0,04%	0,06%	0,21%	0,59%
-niedrig	0,05%	0,08%	0,22%	0,63%
-mittel	0,04%	0,06%	0,19%	0,54%
-hoch	0,04%	0,06%	0,23%	0,65%
Arbeitslosenquote (in Prozentpunkten)	-0,02	-0,03	-0,10	-0,28
-niedrig	-0,02	-0,04	-0,11	-0,31
-mittel	-0,02	-0,03	-0,09	-0,25
-hoch	-0,02	-0,03	-0,11	-0,30
Primärsaldo (in % des BIP)	0,07%	0,11%	0,26%	0,74%
BIP, real (in Mrd. Euro)	1,0	1,5	4,5	12,6
Beschäftigung (in Tausend Personen)	1,7	2,7	9,4	26,5
Arbeitslose (in Tsd Personen, nach Eurostat)	-0,8	-1,3	-4,6	-13,1
Nettojähreseinkommen, in Euro, real	62	98	311	879
Primärsaldo (in Mrd. Euro)	0,3	0,5	1,3	3,5

Niveaubewertung relativ zum Basisszenario mit Klimawandel, aber ohne weitere Anpassung. Niedrig: Personen mit höchstens Pflichtschulabschluss (ISCED 0-2), Hoch: Tertiäre Ausbildung (ISCED 5+).

Quelle: E-PuMA Simulationsmodell.

Betrachtet man das Bruttoinlandsprodukt von der Produktionsseite her, so stärkt insbesondere die höhere Arbeits- und Gesamtfaktorproduktivität direkt die Wertschöpfung. Hinzu kommen der positive Beschäftigungseffekt und der durch die geringeren Abschreibungen höhere Kapitalstock, der sich trotz langfristig leicht rückläufiger Investitionen ergibt. Dementsprechend haben die Anpassungsmaßnahmen eine Ausweitung der Wirtschaftsleistung zur Folge. Verwendungsseitig ist insbesondere der deutliche Konsumeffekt relevant. Bedingt durch die Dämpfung der Lohnstückkosten und der damit einhergehenden Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit nimmt aber auch der Leistungsbilanzsaldo (in der Tabelle nicht dargestellt) spürbar zu. Der Modellsimulation zufolge fällt das reale BIP langfristig im RCP8.5-Szenario um knapp 2,7 Prozent höher aus als im Basisszenario ohne Anpassungsmaßnahmen. Bezogen auf das BIP des Jahres 2023 entspricht dies einem Wertschöpfungseffekt von knapp 13 Mrd. Euro. In den schwächeren Klimawandelszenarien sind die Schäden des Klimawandels geringer, sodass eine geringere Notwendigkeit für Anpassungsmaßnahmen besteht. Dementsprechend sind die positiven Effekte weniger kräftig. Im Einklang mit den empirischen Resultaten sind die positiven Effekte der Adaptierungen bei stärkerer Klimaveränderung überproportional relevant.

Über die positiven volkswirtschaftlichen Auswirkungen führen Anpassungsmaßnahmen zu einer Verbesserung der Bilanz der öffentlichen Haushalte.¹⁵ Auf der Einnahmenseite stärken die höheren Erwerbseinkommen, die einerseits aus der zusätzlichen Beschäftigung und andererseits aus den höheren Durchschnittseinkommen resultieren, die öffentlichen Abgaben auf Erwerbseinkommen (insbesondere Einkommensteuer, Sozialversicherungsbeiträge und Lohnsummenabgaben), der zusätzliche private Konsum erhöht die Konsumsteuereinnahmen (insbesondere Mehrwertsteuer und Verbrauchsabgaben) und der höhere Kapitaleinsatz stärkt das Aufkommen aus Steuern auf Einkünfte der Unternehmen wie der Körperschaftsteuer.¹⁶ Für die Ausgabenseite sind die Folgen der Adaptierungen von gegenläufigen Wirkungskanälen bestimmt. Beispielsweise sinken durch die geringere Arbeitslosigkeit die Ausgaben für Arbeitsmarktpolitik, öffentliche Ausgaben für Pensionen sind kurz- und mittelfristig im Wesentlichen unbeeinflusst, in einer langfristigen Perspektive führen die zusätzlichen Versicherungsbeiträge zu höheren öffentlichen Pensionsausgaben. Nach der Modellsimulation reduzieren die Anpassungsmaßnahmen die nominellen öffentlichen Ausgaben, die Ausgabenquote (in Prozent des BIP) ist demnach deutlich rückläufig. Insgesamt verbessert sich daher der Saldo der öffentlichen Finanzen. Der Primärsaldo (also der Saldo ohne Zinszahlungen) fällt langfristig im RCP8.5-Szenario um 0,7 Prozent des BIP besser aus als im Basisszenario ohne Adaptierungen. Bezogen auf das BIP des Jahres 2023 entspricht das einer Verbesserung um 3,5 Mrd. Euro.

¹⁵ Zu beachten ist, dass in den Modellsimulationen keine höheren öffentlichen Ausgaben aufgrund höherer Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Das kann auch so interpretiert werden, dass angenommen wird, dass diese Maßnahmen vom privaten Sektor, das heißt von Unternehmen und privaten Haushalten, getragen werden.

¹⁶ Gemäß der Modellsimulation steigen die öffentlichen Einnahmen geringfügig weniger stark als das BIP, was u.a. darauf zurückzuführen ist, dass sich der private Konsum weniger dynamisch entwickelt. Die Einnahmenquote (öffentliche Einnahmen relativ zum BIP) ist somit minimal rückläufig.

5. HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Die Darstellung der Literatur zu den wirtschaftlichen Effekten von Anpassungsmaßnahmen sowie die E-PuMA-Modellanalyse haben illustriert, dass diese die negativen wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels abdämpfen können. Wichtig ist daher, bestehende Potenziale der Schadensvermeidung entsprechend zu nutzen, insbesondere dann, wenn ein vorteilhaftes Nutzen-Kosten-Verhältnis einer Maßnahme vorliegt. Dies setzt voraus, dass Innovationspotenziale genutzt werden und auf Veränderungen am Markt entsprechend reagiert wird. Anpassungen gehen mit einer breiten Palette neuer Güter und Technologien einher, wie neue Baustoffe, Wassersparttechnologien, Versicherungsprodukten, aber auch Konsumgütern, wie Hygieneprodukten, Anpassung der Kleidungskollektionen an wärmere Temperaturen oder Produkten für Notfallereignisse. Für Unternehmen spielen auch die Folgen für die Lieferketten und die Etablierung eines entsprechenden Managements eine wichtige Rolle.¹⁷ Von besonderer Bedeutung wird zukünftig auch der Einsatz neuer Technologien zur Reduktion des Risikos sein. So ermöglicht der Einsatz von Satelliten, Drohnen und Internet der Dinge das Erheben einer großen Menge an Daten, die dann etwa mit Hilfe Künstlicher Intelligenz analysiert und somit zukünftige Entwicklungen abgeschätzt werden können. Diese Technologien unterstützen beispielsweise eine rasche Anpassung von Lieferketten in Katastrophensituationen. Der Einsatz von Quantencomputern und virtueller Realität kann dabei unterstützen.¹⁸

Klimawandel und Klimaanpassung sind mit hoher Unsicherheit und einem langen Zeithorizont verbunden. Es ist daher notwendig, dass die einzelnen Systeme einer Volkswirtschaft flexibler werden, um auch größeren Naturkatastrophen widerstehen zu können. Diese Flexibilität kann teilweise dadurch erreicht werden, dass Investitionszyklen kürzer werden, sodass rascher auf Veränderungen reagiert werden kann. Zudem sollen langfristige Planungshorizonte stärker institutionalisiert werden und Optionen gewählt werden, die im Nachhinein auch wieder zurückgenommen werden können (Irreversibilität verhindern). Des Weiteren sind frühzeitige Anpassungsmaßnahmen dann sinnvoll, wenn es sich um langlebige Investitionsgüter oder Maßnahmen mit langer Vorlaufzeit handelt, oder wenn Nachrüstungen sehr teuer sind. Auf der anderen Seite kann es sinnvoll sein, Anpassungen hinauszuzögern, wenn technologische Fortschritte erwartet werden können.

Die öffentliche Hand kann wesentliche Schritte setzen, um die Umsetzung derartiger Adaptierungsmaßnahmen zu forcieren. Angesichts der schwierigen Situation der öffentlichen Finanzen

¹⁷ Siehe beispielsweise Wong und Schuchard (2011).

¹⁸ Siehe WEF (2024).

sowie weiterer Finanzierungserfordernisse wie etwa Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels, zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des österreichischen Standorts sowie demographiebedingter Ausgabensteigerungen bei Pensionen, Gesundheit und Pflege, ist es dabei jedoch essenziell, die Mittel effizient einzusetzen.

Grundsätzlich sollte sich die öffentliche Hand daher auf bestimmte Aufgaben konzentrieren. Dazu zählen etwa das Setzen von Rahmenbedingungen, die Bereitstellung von Information, der Aufbau von Infrastruktur (etwa im Hochwasserschutz) oder die Speicherung bzw. Sicherstellung in bestimmten kritischen Bereichen (z.B. Energie, Wasser). Durch das Setzen von Standards bzw. Normen kann die öffentliche Hand einerseits Anpassungsmaßnahmen unterstützen, andererseits sollten etwa Genehmigungsverfahren und Bauauflagen dahingehend überprüft werden, ob sie Anpassungsmaßnahmen hemmen. Zudem kann das Vorhandensein von externen Effekten bzw. Spillovers eine prominente Rolle der öffentlichen Hand rechtfertigen.

Synergien zwischen Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen nutzen

Bestehende Finanzierungsstrukturen konzentrieren sich global stark auf Klimaschutzmaßnahmen. Für Anpassungsmaßnahmen wird tendenziell weniger ausgegeben, potenziell weil die Kosten kurzfristig oft hoch sind, während die langfristigen Vorteile schwerer sichtbar und messbar sind (Aligishiev et al., 2022; UNEP, 2023). Für Österreich deutet der Umweltförderungsbericht 2023 (BMK, 2023) darauf hin, dass Anpassungs- im Vergleich zu Emissionsreduktionsmaßnahmen deutlich weniger finanzielle Unterstützung erfahren. Auch EU-Förderprogramme wie der Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) stellten in der Vergangenheit deutlich mehr finanzielle Ressourcen für Klimaschutzmaßnahmen zur Verfügung als für Anpassungsmaßnahmen (Preinfalk, 2021).

Gleichzeitig gibt es in vielen Bereichen auch Überschneidungen von Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsmaßnahmen, was eine separate Erfassung erschwert und Synergieeffekte hervorrufen kann. Ein Beispiel hierfür sind thermische Sanierungen von Gebäuden. Andere Beispiele sind hitzeresistente Wälder, die nicht nur das Angebot an Rohstoffen für die Weiterverarbeitung verbessern, sondern auch effizientere CO₂-Senken sind, oder der Ausbau der Photovoltaik, der nicht nur die Emissionen in der Stromerzeugung verringert, sondern auch eine geringere Stromproduktion von Wasserkraftwerken in den Sommermonaten kompensieren kann. Diese Maßnahmen tragen zur Mitigation bei, indem sie die CO₂-Emissionen senken. Gleichzeitig leisten sie aber auch einen Beitrag zur Anpassung, da sie die Folgen der Klimaerwärmung verringern. Diese Art von Synergieeffekten sollte in der bestehenden Förderstruktur verstärkt identifiziert und genutzt werden, um die Effizienz der eingesetzten Mittel zu stärken.

Klimarisikoversicherungen

Versicherungsinstrumente können der finanziellen Risikovorsorge gegen Extremwetterereignisse und Naturrisiken dienen und so neben anderen Optionen eine wichtige Anpassungsmaßnahme sein (siehe etwa Kreft et al., 2022). Umgekehrt beeinträchtigen die zunehmende Häufigkeit und Stärke dieser Ereignisse die Verfüg- und Leistbarkeit von Versicherungen.

Wesentlich ist, dass geeignete Rahmenbedingungen gesetzt werden, die eine entsprechend große Risikostreuung für die Versicherer ermöglichen. Bündelversicherungen, die verschiedene Klimarisiken abdecken, dürften Vorzüge gegenüber Einzelinstrumenten aufweisen. Prinzipiell gibt es verschiedene Optionen, um die Absicherung auf eine breitere Basis zu stellen, beispielsweise (Teil-)Pflichtversicherungssysteme, Opt-Out-Lösungen etc. Auf europäischer Ebene werden in diesem Zusammenhang auch Public-Private-Partnerships zwischen der öffentlichen Hand und dem Versicherungssektor diskutiert (siehe etwa Keskitalo et al., 2014). Dazu zählen etwa der Aufbau bzw. die Verbesserung von Klimarisiken-Datenbanken, was die (Informations-)Kosten von privaten Haushalten und Versicherungsunternehmen reduzieren kann, oder Zuschüsse zu Versicherungsprämien (bei gleichzeitiger Reduktion der Auszahlungen aus dem Katastrophenfonds), sodass sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Risikoausgleichen verbessert. Zudem sind adäquate (leistbare) Prämien in Verbindung mit einem entsprechend hohen Selbstbehalt von Vorteil, und Risikoreduzierungsmaßnahmen der Versicherungsnehmer:innen sollten entsprechend in Form geringerer Prämien gewürdigt werden.

Investitionsanreize

Ähnlich wie bei den Maßnahmen zur Verhinderung des Klimawandels können auch bei Klimawandelanpassungsmaßnahmen diverse politische Instrumente eingesetzt werden, um private Investitionen zu erhöhen. Diese Instrumente sollen auf die Reduktion des Risikos einer privaten Investition oder eine Stärkung der Rendite abzielen. Analog zu den Maßnahmen, die für die Energiewende eingesetzt werden (siehe Polzin et al., 2019), eignen sich folgende Instrumente auch für den Fall der Klimaanpassung:

- *Steuerliche Maßnahmen im Bereich der Einkommen- bzw. Körperschaftsteuer* erhöhen die Rendite von Investitionen. Diese könnten beispielsweise Steuergutschriften für Investitionen in den Hochwasserschutz, in Frühwarnsysteme für Naturkatastrophen oder in Klimaanlagen umfassen. Steuergutschriften werden nachgelagert gewährt und sind damit mit politischer Unsicherheit dahingehend verbunden, dass sie Gesetzesänderungen unterworfen sind.
- *Subventionierte Investitionsdarlehen/-fonds und Investitionssteuergutschriften* verringern die Kosten der Investitionen. Öffentliche Darlehen und Fonds stellen Finanzmittel zur Verfügung,

Kapitalzuschüsse und die steuerliche Absetzbarkeit von Investitionskosten erhöhen die Rendite der Investition.

- *Garantien* verringern das Risiko für Investor:innen und beschleunigen so die Investitionstätigkeit. Dabei ist darauf zu achten, dass ein hinreichender Teil des Risikos weiterhin bei den Unternehmen verbleibt, da es sonst zur Finanzierung von unrentablen Projekten kommt.
- *Langfristige Ziele/Verpflichtungen* sind aufgrund höherer Planungssicherheit investitionsfördernd, hängen jedoch oft von der Glaubwürdigkeit der Regierung ab. Langfristige Strategien sind besonders glaubwürdig, wenn sie mit einer breiten, überparteilichen Ausrichtung verbunden sind.
- *Versicherungen, Katastrophenhilfe oder Unterstützungsfonds* können Investitionen und wirtschaftliche Aktivität angesichts der Klimakrise stärken.

Förderung von Forschung und Entwicklung

Ähnlich wie in anderen Bereich der *Deep-Technologien* besteht bei Technologien im Bereich der Klimaanpassung oft ein hohes technologisches Risiko sowie ein hoher Bedarf (*Asset heaviness*) an Ressourcen für Infrastruktur und Kapitalinvestitionen (z.B. Produktionsanlagen oder Labore), um neue Technologien zu entwickeln, was die Anpassungsfähigkeit und Skalierbarkeit verlangsamen kann. Um Forschung und Entwicklung in diesem Bereich zu fördern, sind die Mobilisierung von größeren Summen, öffentliche Unterstützung und eine langfristige Ausrichtung notwendig. Von der öffentlichen Hand können die folgenden Maßnahmen ergriffen werden:

- *Öffentliche Finanzierung und Zuschüsse*: Bereitstellung von staatlichen Zuschüssen, Stipendien oder Förderprogrammen für Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die Lösungen zur Klimaanpassung entwickeln.
- *Steuererleichterungen und -anreize für Unternehmen*, die in klimafreundliche oder anpassungsorientierte Forschung, wie z.B. die Entwicklung von Technologien zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit von Gebäuden oder Infrastrukturen, investieren. Ein ähnliches Modell für allgemeine Technologieentwicklung existiert in Österreich in Form der Forschungsprämie.
- *Öffentlich-private Partnerschaften* zwischen der öffentlichen Hand, Forschungseinrichtungen und der Privatwirtschaft. Hier könnte die öffentliche Hand als finanzieller Unterstützer und als Vorreiter für den Einsatz neuer Technologien agieren. Beispiele dafür sind das Programm JPI Climate, das unter anderem Anpassungsprojekte unterstützt,¹⁹ sowie die National Adaptation Research Facility in Australien.²⁰

¹⁹ <https://jpi-climate.eu/project/>

²⁰ <https://nccarf.edu.au/>

- *Spezialisierte Dachfonds* investieren in mehrere spezialisierte Fonds oder Projekte, wodurch das finanzielle Risiko breiter gestreut wird. Insbesondere bei innovativen Technologien, die noch nicht ausgereift sind, ermöglichen sie die Bündelung von Kapital verschiedener Investor:innen (öffentlich und privat) für gezielte Investitionen in klimaanpassungsrelevante Projekte. Ein Beispiel hierfür ist der Emerging Market Climate Action Fund (EMCAF) der Europäischen Investitionsbank, der unter anderem in Klimaanpassungsprojekte investiert.²¹

Bewusstseinsbildung

Die vorhandene Literatur legt nahe, dass oftmals ein wenig rationales Verhalten der Bevölkerung vor, während und nach einem Extremwetterereignis vorliegt. Dem kann entgegengewirkt werden, indem das Bewusstsein der Bevölkerung für derartige Risiken gestärkt wird und so das subjektive Risikoempfinden stärker an das objektive (tatsächlich existierende) Risiko angepasst wird. Beispielsweise befasst sich die Studie der Deutschen Bundeswehr (2021) mit der Entwicklung von Demonstrationsmodellen zur Kommunikation von alpinen Naturgefahren. Die im Literaturüberblick dargestellte Untersuchung in Italien (Giudici et al., 2017) zeigt, dass ein höheres Bewusstsein auf regionaler politischer Ebene damit einhergeht, dass Gründungen von Unternehmen, deren Geschäftsmodell im Zusammenhang mit Anpassungsmaßnahmen steht, überdurchschnittlich oft auftreten.

Landwirtschaft und Forstwirtschaft

Die Anpassung von Anbaumethoden an langfristige Klimaentwicklungen sowie die Auswahl klimaresistenter Pflanzen sind von grundlegender Bedeutung und weisen laut Tröltzsch et al. (2012) ein sehr vorteilhaftes Nutzen-Kosten-Verhältnis auf, wobei die Autor:innen dies in der zeitlichen Perspektive eher als langfristig wirksam ansehen. Auch wassersparende Bewässerungssysteme und eine optimierte Bewässerungsplanung spielen eine wichtige Rolle. Nach BMK (2024b) sollen Instrumente entwickelt werden, um das landwirtschaftliche Risiko zu reduzieren und z.B. über Versicherungslösungen das Risiko breiter zu streuen. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch das Durchforsten der bestehenden Förderungen auf EU- und nationaler Ebene, um Verharrungstendenzen entgegenzuwirken, sodass Anpassungsmaßnahmen nicht verhindert werden.

Auch in der Forstwirtschaft ist die Auswahl geeigneter Baumarten und Mischungen, die sich an veränderte Klimabedingungen anpasst, entscheidend. Angesichts der langen Zeiträume bei einer Auf- bzw. Umforstung sind diese Anpassungen zeitnah umzusetzen. Maßnahmen zur Prävention und Bekämpfung von Waldbränden sind ebenso wichtig wie die Erhaltung der biologischen Vielfalt und die Förderung der Ökosystemfunktionen der Wälder.

²¹ <https://emcaf.allianzgi.com/>

Wassermanagement und Energiesystem

Der Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasserressourcen sind essenziell, um sowohl die Trinkwasserversorgung als auch andere wasserbezogene Bedürfnisse (etwa für Landwirtschaft und Industrie) durch planerische und technische Maßnahmen sicherzustellen. Ein adaptives Dürrerisikomanagementsystem soll entwickelt werden, insbesondere unter Berücksichtigung einer verstärkten Bewässerung in der Landwirtschaft, die nach bestehenden Analysen jedoch ein unvorteilhafteres Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweist. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass technologische Entwicklungen, wie Kreislaufsysteme in der Bewässerung oder die Verwendung von KI für den optimalen Wassereinsatz, dieses Verhältnis zukünftig verbessern können.

Im Bereich des Energiemanagements ist es wesentlich, die Anfälligkeit des Energiesystems für klimatische Risiken zu reduzieren und eine langfristig zuverlässige Versorgung zu gewährleisten. Vorsorge ist dafür zu treffen, dass Anpassungsmaßnahmen in anderen Bereichen (wie etwa für Kühlung von Krankenhäusern und Arbeitsplätzen, die für die Gesundheit der Patient:innen bzw. die Produktivität der Beschäftigten von besonderer Relevanz sind) mit einem gesteigerten Verbrauch von elektrischer Energie einhergehen. Dazu können Maßnahmen wie die Steigerung der Energieeffizienz sowie die Diversifizierung der Energiequellen dienen. Nach bestehenden Analysen weisen etwa Umstellungen bei der Kühlung von thermischen Kraftwerken vorteilhafte Nutzen-Kosten-Verhältnisse auf.

Die Gewährleistung einer klimaresistenten Energieinfrastruktur muss den potenziellen Anstieg extremer Wetterereignisse berücksichtigen. Hinzu kommen der Netzausbau im Hinblick auf zukünftige regionale Verschiebungen von Energieangebot und -nachfrage sowie Entwicklung und Einsatz von Energiespeicheroptionen. Darüber hinaus sollen die Auswirkungen des Klimawandels konsequent in energiepolitische Entscheidungen, Strategien und Forschungsaktivitäten integriert werden.

Tourismus

Der Klimawandel hat bereits spürbare Auswirkungen auf den Tourismussektor, insbesondere in früher schneesicheren Wintersportregionen, während gleichzeitig neue Möglichkeiten für den Sommer-, Städte- und Ganzjahrestourismus entstehen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird etwa die Entwicklung und laufende Adaptierung regional abgestimmter Tourismusangebote empfohlen. Geht man nach den Untersuchungen von Gonseth und Vielle (2019) bzw. Tröltzsch et al. (2012), so können Anpassungen im Wintertourismus weiterhin eine wichtige Rolle spielen.

Gefahrenbewusstsein, Risikomanagement und Katastrophenvorsorge

Nachhaltige Raumentwicklungsstrategien spielen eine Schlüsselrolle und umfassen Maßnahmen wie die Wasserrückhaltung in der Landschaft und die Wiederherstellung natürlicher Überschwemmungsgebiete,

um Risiken zu mindern. Ergänzt werden diese Ansätze durch die Verbesserung von Mess-, Prognose- und Frühwarnsystemen sowie die Förderung von Forschung und Entwicklung, die sich auf die klimabedingte Zunahme von Naturgefahren konzentriert. Schutzmaßnahmen für Gebäude und kritische Infrastrukturen sowie optimierte Risikotransfermechanismen sollen ebenfalls die Risikoprävention unterstützen. Empfehlungen umfassen eine inklusive Risiko- und Krisenkommunikation, die auf zielgruppenspezifische Strategien zur Sensibilisierung und Verhaltenssteuerung in Notfällen setzt. Viele dieser Maßnahmen sind bereits zeitnah von Bedeutung, wie man am Hochwasser 2024 sehen kann, und weisen in den Untersuchungen zumeist vorteilhafte bis sehr vorteilhafte Nutzen-Kosten-Verhältnisse auf.

Reformnotwendigkeit im Finanzausgleich ausloten

Die Zuständigkeit für öffentliche Klimaanpassungsmaßnahmen liegt häufig auf regionaler und lokaler Gebietskörperschaftsebene. Hier ergeben sich zwei Aspekte, die im Zusammenhang mit dem Finanzausgleich stehen. Der erste Aspekt bezieht sich auf die Frage, inwiefern höherer regionaler bzw. lokaler Bedarf an Anpassungsmaßnahmen in der Verteilung der Finanzmittel berücksichtigt werden soll (Stichwort Aufgabenorientierung im Finanzausgleich). Auf der einen Seite kann eine Aufgabenorientierung die Finanzierung solcher Maßnahmen erheblich erleichtern, auf der anderen Seite führen höhere Mittel zu einer Einzementierung des Status Quo, was insgesamt zu höheren öffentlichen Ausgaben führen kann.

Die zweite Frage bezieht sich auf eine Stärkung der Flexibilität hinsichtlich der Mittelaufbringung auf regionaler und lokaler Ebene. Der Finanzausgleich bestimmt die eigenen Abgaben von Ländern und Gemeinden und legt bei Gemeinden den Steuersatz bzw. Höchstsatz fest. Auf Gemeindeebene sind insbesondere die Kommunalsteuer und die Grundsteuer relevant. Die Höhe der Kommunalsteuer ist zentral bestimmt und die allermeisten Gemeinden wenden bereits den höchsten Hebesatz bei der Grundsteuer an. Dementsprechend haben Gemeinden hier keinen Spielraum, zusätzliche Einnahmen zu generieren, um Anpassungsmaßnahmen zu finanzieren. Mehr Flexibilität wäre hierbei notwendig.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Maßnahmen, die die Anpassung an den Klimawandel verstärken, effektiv sein können. Viele dieser Maßnahmen werden auf privater Ebene erfolgen und finanziert werden. Die öffentliche Hand soll hierbei unterstützend wirken. Österreich hat sich verpflichtet, Treibhausgasemissionen deutlich zu verringern. Dies erfordert auch öffentliche Mittel, um das Ziel zu erreichen. Angesichts knapper öffentlicher Mittel ist auf die Effizienz und Effektivität von Maßnahmen zu achten. Über die internationalen Verpflichtungen hinausgehende Ziele sollten angesichts des geringen Einflusses Österreich auf die globalen Emissionen vermieden werden. Entsprechend frei werdende Ressourcen sollten angesichts der hohen positiven Wertschöpfungseffekte für Anpassungsmaßnahmen eingesetzt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

Aaheim, A., H. Amundsen, T. Dokken, T. Wei (2012). Impacts and adaptation to climate change in European economies, *Global Environmental Change* 22(4), 959–968.

Abel, G. J., M. Brottrager, J. C. Cuaresma und R. Muttarak (2019). Climate, conflict and forced migration, *Global environmental change* 54, 239-249.

AFRY Austria (2023). Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraft in Österreich, Endbericht im Auftrag von Österreichs Energie.

Annicchiarico, B., S. Battles, F. Di Dio, P. Molina und P. Zoppoli (2017). GHG mitigation schemes and energy policies: A model-based assessment for the Italian economy, *Economic Modelling* 61, 495–509.

Aroonruengsawat, A. und M. Auffhammer (2012). Correction: Impacts of climate change on residential electricity consumption: Evidence from billing data, in: California Energy Commission White Paper.

Auffhammer, M., P. Baylis und C. H. Hausman (2017). Climate change is projected to have severe impacts on the frequency and intensity of peak electricity demand across the United States, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(8), 1886-1891.

Auffhammer, M. (2018). Quantifying economic damages from climate change, *Journal of Economic Perspectives* 32(4), 33-52.

Auffhammer, M. (2022). Climate Adaptive Response Estimation: Short and long run impacts of climate change on residential electricity and natural gas consumption, *Journal of Environmental Economics and Management* 114, 102669.

Bachner, G. (2017). Assessing the economy-wide effects of climate change adaptation options of land transport systems in Austria. *Regional Environmental Change*, 17(3), 929–940.

Bachner, G., B. Bednar-Friedl und N. Knittel (2019). How does climate change adaptation affect public budgets? Development of an assessment framework and a demonstration for Austria, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24(7), 1325–1341.

Bachner, G., D. Lincke und J. Hinkel (2022). The macroeconomic effects of adapting to high-end sea-level rise via protection and migration, *Nature Communications* 13(1), 5705.

Barreca, A., K. Clay, O. Deschenes, M. Greenstone und J. S. Shapiro (2016). Adapting to climate change: The remarkable decline in the U.S. temperature-mortality relationship over the 20th century, *Journal of Political Economy* 124(1), 105-159.

- Beine M. und C. R. Parsons (2017). Climatic Factors as Determinants of International Migration: Redux, CESifo Economic Studies 2017, 1-17.
- Beine, M. und C. R. Parsons (2015). Climatic Factors as Determinants of International Migration, Scandinavian Journal of Economics 117(2), 723-767.
- Beine, M. und L. Jeusette (2021). A meta-analysis of the literature on climate change and migration, Journal of Demographic Economics 87(3), 293-344.
- Bellon, M. und E. Massetti (2022). Economic Principles for Integrating Adaptation to Climate Change into Fiscal Policy, Staff Climate Notes 2022(001), 1.
- Bellon, M., Z. Aligishiev und E. Massetti (2022). Macro-Fiscal Implications of Adaptation to Climate Change, Staff Climate Notes 2022(002), 1.
- Berger, J. und L. Strohner (2020). Documentation of the Public Policy Model for Austria and other European countries (PuMA), EcoAustria Research Paper No. 11.
- Berger, J. und L. Strohner (2022). Extensions of the Energy Public Policy Model for Austria and other European countries E-(PuMA), EcoAustria Research Paper No. 19.
- Berger, J., C. Keuschnigg, M. Keuschnigg, M. Miess, L. Strohner und R. Winter-Ebmer (2009). Modelling of Labour Markets in the European Union, Studie im Auftrag der DG EMPL der Europäischen Kommission.
- Berger, J., L. Strohner, N. Graf und M. Köppl-Turyňa (2023). Final Report – Update and Extension of the Labour Market Model, Studie im Auftrag der DG EMPL der Europäischen Kommission.
- Bilal, A. und D. Känzig (2024). The Macroeconomic Impact of Climate Change: Global vs. Local Temperature, NBER Working Paper 32450.
- Boer, G., G. Flato und D. Ramsden (2000). A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century, Climate Dynamics 16, 427-450.
- Boere, E., H. Valin, B. Bodirsky, F. Baier, J. Balkovic, M. Batka, C. Folberth, K. Karstens, G. Kindermann, A. Krasovskii, D. Leclere, X. Wang, I. Weindl, P. Havlik und H. Lotze-Campen (2019). D2.2 Impacts on agriculture including forestry & fishery. Deliverable of the H2020 COACCH project.
- Boone, J. und L. Bovenberg (2002). Optimal Labour Taxation and Search, Journal of Public Economics 85, 53–97.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024a). Energie in Österreich. Zahlen, Daten, Fakten.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (2024b). Die Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel.

Burke, M., S. M. Hsiang und E. Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production, *Nature* 527(7577), 235–239.

Carleton, T., A. Jina, M. Delgado, M. Greenstone, T. Houser, S. Hsiang, A. Hultgren, R. E. Kopp, K. E. Mccusker, I. Nath, J. Rising, A. Rode, H. K. Seo, A. Viaene, J. Yuan und A. T. Zhang (2022). Valuing the global mortality consequences of climate change accounting for adaptation costs and benefits, *The Quarterly Journal of Economics* 137(4), 2037-2105.

Cattaneo, C. und G. Peri (2016). The Migration Response to Increasing Temperatures, *Journal of Development Economics* 122, 127-146.

Chimani B., G. Heinrich, M. Hofstätter, M. Kerschbaumer, S. Kienberger, A. Leuprecht., A. Lexer, S. Peßenteiner, M. S. Poetsch, M. Salzmann, R. Spiekermann, M. Switaneck und H. Truhetz (2016). ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien.

Colelli, F. P., J. Emmerling, G. Marangoni, M. N. Mistry und E. De Cian (2022). Increased energy use for adaptation significantly impacts mitigation pathways, *Nature Communications* 13(1), 49-64.

Conway, D., A. Dechezlepretre, I. Hascic und N. Johnstone (2015). Invention and Diffusion of Water Supply and Water Efficiency Technologies: Insights from Global Patent Dataset.

Dechezlepretre, A., S. Fankhauser, M. Glachant, J. Stoeber und S. Touboul (2020). Invention and Global Diffusion of Technologies for Climate Change Adaptation: A Patent Analysis, World Bank und GFDRR.

Dell, M., B. F. Jones und B. A. Olken (2012). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century, *American Economic Journal: Macroeconomics* 4(3), 66-95.

Dell, M., B. F. Jones und B. A. Olken (2014). What do we learn from the weather? The new climate-economy literature, *Journal of Economic Literature* 52(3), 740-798.

Deschenes, O. und M. Greenstone (2011) Climate change, mortality and adaptation: Evidence from annual fluctuations in weather in the U.S., *American Economic Journal: Applied Economics* 3, 152-185.

Dixit, A. und J. E. Stiglitz (1977). Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity, *American Economic Review* 67(3), 297–308.

Dottori, F., L. Mentaschi, A. Bianchi, L. Alfieri und L. Feyen (2020). Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change, JRC Technical Report 118425.

- Europäische Kommission (2021). Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change.
- European Environment Agency. (2024). European climate risk assessment: Executive summary, Publications Office.
- Fankhauser, S. (2017). Adaptation to Climate Change, *Annual Review of Resource Economics* 9, 209-230.
- Feng, S., M. Oppenheimer und W. Schlenker (2012). Climate Change, Crop Yields, and Internal Migration in the United States, NBER Working Paper No. 17734.
- Feyen, L., J. C. Ciscar, S. Gosling, D. Ibarreta und A. Soria (2020). Climate change impacts and adaptation in Europe: JRC PESETA IV final report.
- Fisher-Vanden, K., I. Sue Wing, E. Lanzi und D. Popp (2013). Modeling climate change feedbacks and adaptation responses: Recent approaches and shortcomings, *Climatic Change* 117(3), 481–495.
- Franco, G. und A. Sanstad (2008). Climate change and electricity demand in California, *Climate Change* 87, 139-151.
- Fried, S. (2018). Seawalls and stilts: A quantitative macro study of climate adaptation.
- García-León, D. (2015). Weather and Income: Lessons from the Main European Regions, SSRN Scholarly Paper 2602748. Social Science Research Network.
- García-León, D., A. Casanueva, G. Standardi, A. Burgstall, A. D. Flouris und L. Nybo (2021). Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe, *Nature Communications* 12(1), 5807.
- Giudici, G., M. Guerini und C. Rossi-Lamastra (2017). The creation of cleantech startups at the local level: the role of knowledge availability and environmental awareness, *Small Business Economics*, DOI: 10.1007/s11187-017-9936-9.
- Gonseth, C. und M. Vielle (2019). A general equilibrium assessment of climate change impacts on Swiss winter tourism with adaptation, *Environmental Modeling & Assessment* 24, 265-277.
- Gosling S. N., J. Zaherpour und D. Ibarreta (2018): PESETA III: Climate change impacts on labour productivity, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Gouel, C. und D. Laborde (2021). The crucial role of domestic and international market-mediated adaptation to climate change, *Journal of Environmental Economics and Management* 106, 102408.
- Gourio, F. und C. Fries (2020). Adaptation and the Cost of Rising Temperature for the U.S. economy, Federal Reserve Bank of Chicago WP 2020-08.

- Gröger, A. und Y. Zylberberg (2016). Internal Labor Migration as a Shock Coping Strategy: Evidence from a Typhoon, *American Economic Journal: Applied Economics* 8(2), 123-153.
- Hayashi F. (1982). Tobin's Marginal Q and Average Q. A Neoclassical Interpretation, *Econometrica* 50, 213–224.
- Hornbeck (2012). The Enduring Impact of the American Dust Bowl: Short- and Long-Run Adjustments to Environmental Catastrophe, *American Economic Review* 102(4), 1477-1507.
- Jaag, C. (2009). Education, demographics, and the economy, *Journal of Pension Economics and Finance* 8(2), 189–223.
- Jennings, J. A. und C. L. Gray (2015). Climate Variability and Human Migration in the Netherlands, 1865-1937, *Population and Environment* 36(3), 255-278.
- Kahn, M. E. (2016). The Climate Change Adaptation Literature, *Review of Environmental Economics and Policy* 10(1), 166–178.
- Kahn, M. E., K. Mohaddes, R. N. C. Ng, M. H. Pesaran, M. Raissi und J.-C. Yang (2021). Long-term macroeconomic effects of climate change: A cross-country analysis, *Energy Economics* 104, 105624.
- Kalkuhl, M. und L. Wenz (2020). The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions, *Journal of Environmental Economics and Management* 103, 102360.
- Keskitalo, E. C. H., G. Vulturius und P. Scholten (2012). Adaptation to climate change in the insurance sector: examples from the UK, Germany and the Netherlands, *Natural Hazards* 71, 315-334.
- Keuschnigg, C. und W. Kohler (2002). Eastern Enlargement of the EU: How Much Is It Worth for Austria?, *Review of International Economics* 10(2), 324–342.
- Kolstad, C. D. und F. C. Moore (2020). Estimating the Economic Impacts of Climate Change Using Weather Observations, *Review of Environmental Economics and Policy* 14(1), 1-24.
- Kreft, S., S. Sandholz, S. S. Bulut, M. Mirwald und D. Kohler (2022). Klimarisikoversicherung – Potenziale als strategisches Instrument zur Klimaanpassung in Deutschland, im Auftrag des Umweltbundesamts.
- Krusell, P., L.E. Ohanian, J.V. Rios-Rull und G.L. Violante (2000). Capital-skill complementarity and inequality: A macroeconomic analysis, *Econometrica* 68(5), 1029–1054.
- Kurukulasuriya, P., N. Kala und R. Mendelsohn (2011). Adaptation and Climate Change Impacts: A Structural Ricardian Model of Irrigation and Farm Income in Africa, *Climate Change Economics* 2(2), 149-174.

- Labriet, M., S. R. Joshi, M. Vielle, P. B. Holden, N. R. Edwards, A. Kanudia, R. Loulou und F. Babonneau (2015). Worldwide impacts of climate change on energy for heating and cooling, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20(7), 1111–1136.
- Lenton, T. M., J. Rockström, O. Gaffney, S. Rahmstorf, K. Richardson, W. Steffen und H. J. Schellnhuber (2019). Climate tipping points — too risky to bet against, *Nature* 575(7784), 592–595.
- Lincke, D., H. Hinkel, K. van Ginkel, A. Jeuken, W. Botzen, M. Tesselaaar, E. Scoccimarro und P. Ignjacevic (2018). D2.3 Impacts on infrastructure, built environment, and transport, Deliverable of the H2020 COACCH project.
- McIntosh, C. T. und W. Schlenker (2006). Identifying Non-Linearities in Fixed Effects Models, Working Paper, School of International Relations and Pacific Studies, University of California at San Diego.
- Mérel, P. und M. Gammans (2021). Climate Econometrics: Can the Panel Approach Account for Long-Run Adaptation?, *American Journal of Agricultural Economics* 103(4), 1207-1238.
- Miao, Q. und D. Popp (2014). Necessity as the mother of invention: Innovative responses to natural disasters, *Journal of Environmental Economics and Management* 68, 280-295.
- Mortensen, D. (1986). Job search and labour market analysis, in: Ashenfelter, O., Layard, R. (Hrsg.), *Handbook of Labour Economics*, vol. 2, Amsterdam: Elsevier Science.
- Mortensen, D. und C. Pissarides (1999). New developments in models of search in the labor market, in: Ashenfelter, O., Card, D. (Hrsg.), *Handbook of Labor Economics*, vol. 3B. Amsterdam: Elsevier Science.
- Nazareth, M. S., A. Gurgel und D. A. Da Cunha (2022). Economic effects of projected decrease in Brazilian agricultural productivity under climate change, *GeoJournal* 87(2), 957–970.
- Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(7), 1518–1523.
- Ohanian, L. E., M. Orak und S. Shen (2021). Revisiting Capital-Skill Complementarity, Inequality, and Labor Share, NBER Working Paper Series 28747.
- Pérez-Blanco, C. D., R. Parrado, A. H. Essenfelder, J. Bodoque, L. Gil-García, C. Gutiérrez-Martín, J. Ladera und G. Standardi (2022). Assessing farmers' adaptation responses to water conservation policies through modular recursive hydro-micro-macro-economic modeling, *Journal of Cleaner Production* 360, 132208.
- Pigou, A. C. 1920. *The Economics of Welfare*. 1st edn. London: Macmillan.
- Pindyck, R. S. (2013). Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?, *Journal of Economic Literature* 51(3), 860-872.

Pindyck, R. S. (2019). The social cost of carbon revisited, *Journal of Environmental Economics and Management* 94, 140-160.

Piontek, F., L. Drouet, J. Emmerling, T. Kompas, A. Méjean, C. Otto, J. Rising, B. Soergel, N. Taconet und M. Tavoni (2021). Integrated perspective on translating biophysical to economic impacts of climate change, *Nature Climate Change* 11(7), 563–572.

Polzin, F., F. Egli, B. Steffen und T. S. Schmidt (2019). How do policies mobilize private finance for renewable energy?—A systematic review with an investor perspective, *Applied Energy* 236, 1249-1268.

Preinfalk, E. (2021). Public climate change adaptation: The status quo, macroeconomic & budgetary implications in selected EU Member States.

Rasmussen, D. J., M. Meinshausen und R. E. Kopp (2016). Probability-Weighted Ensembles of U.S. County-Level Climate Projections for Climate Risk Analysis, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55(10), 2301-2322.

Ratto, M., W. Roeger und J. in't Veld (2009). Quest III: An Estimated Open-Economy DSGE Model of the Euro Area with Fiscal and Monetary Policy, *Economic Modelling* 26, 222–233.

Rennert, K., F. Errickson, B. C. Prest, L. Rennels, R. G. Newell, W. Pizer, C. Kingdon, J. Wingenroth, R. Cooke, B. Parthum, D. Smith, K. Cromar, D. Diaz, F. C. Moore, U. K. Müller, R. J. Plevin, A. E. Raftery, H. Ševčíková, H. Sheets, J. H. Stock, T. Tan, M. Watson, T. E. Wong und D. Anthoff (2022). Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂, *Nature* 610(7933), 687–692.

Roson, R. und R. Damania (2016). Simulating the Macroeconomic Impact of Future Water Scarcity: An Assessment of Alternative Scenarios.

Schleypen, J. R., S. Dasgupta, S. Borsky, M. Jury, M. Ščasný und L. Bezhanishvili (2019). D2.4 Impacts on Industry, Energy, Services, and Trade, Deliverable of the H2020 COACCH project.

Schwarze, R., Q. Oberpriller, M. Peter und J. Füssler (2022). Modelling the Cost and Benefits of Adaptation. A Targeted Review on Integrated Assessment Models with a Special Focus on Adaptation Modelling, in: Kondrup, C., P. Mercogliano, F. Bosello, J. Mysiak, E. Scoccimarro, A. Rizzo, R. Ebrey, M. de Ruiter, A. Jeuken und P. Watkiss (Hrsg.) *Climate Adaptation Modelling*, Springer Climate, Cham, Schweiz.

Seo, S. N. und R. Mendelsohn (2008). An analysis of crop choice: Adapting to climate change in South American farms, *Ecological Economics* 67, 109-116.

Seo, S. N., B. A. McCarl und R. Mendelsohn (2010). From beef cattle to sheep under global warming? An analysis of adaptation by livestock species choice in South America, *Ecological Economics* 69, 2486-2494.

Steininger, K. W., B. Bednar-Friedl, N. Knittel, G. Kirchengast, S. Nabernegg, K. Williges, R. Mestel, H. Hutter, L. Kenner (2020). Klimapolitik in Österreich: Innovationschance Coronakrise und die Kosten des Nicht-Handelns.

Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, Cambridge.

Teotónio, C., M. Rodríguez, P. Roebeling und P. Fortes (2020). Water competition through the 'water-energy' nexus: Assessing the economic impacts of climate change in a Mediterranean context, *Energy Economics* 85, 104539.

Tröltzsch, J., B. Görlach, H. Lückge, M. Peter, C. Sartorius (2012). *Kosten und Nutzen von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel*, Umweltbundesamt.

UNFCC (2006). *Technologies for Adaptation to Climate Change*.

United Nations Framework Convention on Climate Change (2011). *Assessing the costs and benefits of adaptation options. An overview of approaches*.

Universität der Bundeswehr München. (2021). *Abschlussbericht: Studie zu physikalischen Naturgefahrenmodellen*.

Van der Wijst, K., F. Bosello, P. Ignjacevic, E. Preinfalk et al. (2021). D4.3 Macroeconomic assessment of policy effectiveness. Deliverable of the H2020 COACCH project.

Varga, J., W. Roeger und J. in't Veld (2021). *E-QUEST – A Multi-Region Sectoral Dynamic General Equilibrium Model with Energy*, European Economy Discussion Paper 146.

Wang, J., R. Mendelsohn, A. Dinar und J. Huang (2010). How Chinese Farmers Change Crop Choice to Adapt to Climate Change, *Climate Change Economics* 1(3), 167-185.

Watkiss, P. (2022). *Challenges for Adaptation Modelling*, in: Kondrup, C., P. Mercogliano, F. Bosello, J. Mysiak, E. Scoccimarro, A. Rizzo, R. Ebrey, M. de Ruiter, A. Jeuken und P. Watkiss (Hrsg.) *Climate Adaptation Modelling*, Springer Climate, Cham, Schweiz.

Watkiss, P. und E. Preinfalk (2022). *The economics of climate adaptation in the EU: new evidence from recent research*.

Watkiss, P. und M. Watkiss (2021). D5.7 Climate Change Impacts & Policy Synthesis, Deliverable of the H2020 COACCH project.

WEF (2024). *Innovation and Adaptation in the Climate Crisis: Technology for the New Normal*, Insight Report in collaboration with Boston Consulting Group.

Wei, T. und A. Aaheim (2023). Climate change adaptation based on computable general equilibrium models – a systematic review, *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 15(4), 561–576.

Weyant, J., O. Davidson, H. Dowlatabadi, J. Edmonds, M. Grubb, E. A. Parson, R. Richels, J. Rotmans, P. R. Shukla, R. S. J. Tol, W. Cline und S. Fankhauser (1995). *Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results*, in: *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 367-396, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Wong, J. und R. Schuchard (2011). *Adapting to Climate Change: A Guide for the Consumer Products Industry*, BSR industry series, [Link](#).

APPENDIX: KURZBESCHREIBUNG VON E-PUMA

E-PuMA (Energy-Public policy Model for Austria) ist ein allgemeines dynamisches Gleichgewichtsmodell (dynamic computable general equilibrium model – DCGE), mit besonderem Fokus auf den Arbeitsmarkt, den öffentlichen Sektor und den Energieeinsatz. Es eignet sich speziell für die Beurteilung von wirtschaftspolitischen Maßnahmen und strukturellen Änderungen und deren Auswirkungen auf die österreichische Volkswirtschaft. Einige Beispiele dafür sind Reformen im Bereich der öffentlichen Finanzen, der staatlichen Pensionen, der CO₂-Besteuerung, der Aus- und Weiterbildung, der aktiven Arbeitsmarktpolitik oder auch eine Analyse der Auswirkungen verschiedener Zuwanderungsszenarien. Die dynamische Struktur des Modells erlaubt die Untersuchung von kurz-, mittel- und langfristigen Effekten. Durch die Modellierung des Verhaltens der Haushalte und der Unternehmen können deren Reaktionen genau analysiert werden. Österreich wird als kleine offene Volkswirtschaft modelliert, was impliziert, dass der Kapitalverkehr mobil und der heimische Zinssatz durch weltweite Kapitalnachfrage und -angebot bestimmt wird. Die Kalibrierung von E-PuMA repliziert die gegenwärtige Situation der österreichischen Volkswirtschaft. Dieses Modell ist eine Weiterentwicklung von EU-LMM, das die Autor:innen für die Generaldirektion Beschäftigung der Europäischen Kommission entwickelt haben, siehe etwa Berger et al. (2009) und Berger et al. (2023). Eine ausführliche Beschreibung von PuMA findet sich in Berger und Strohner (2020), die Modellerweiterungen für den Energiebereich sind in Berger und Strohner (2022) dokumentiert.

Keuschnigg und Kohler (2002) bzw. Ratto et al. (2009) folgend werden Unternehmen in Investitionsgüter- und Endproduktproduzenten unterteilt. Investitionsgüterproduzenten transformieren Endprodukte, die sie aus dem In- und Ausland beziehen, in Investitionsgüter. Diese Unternehmen maximieren den Gegenwartswert der Dividendenzahlungen über die optimale Wahl des Investitionsniveaus gemäß der von Hayashi (1982) entwickelten Q-Theorie und stellen die Investitionsgüter wiederum den Endproduktproduzenten für die Produktion zur Verfügung. Kapital wird mit einer variablen Rate abgeschrieben, die von der Kapitalnutzung abhängt. Auf dem Investitionsgütermarkt herrscht perfekter Wettbewerb.

Energieunternehmen transformieren verschiedene Energieträger in Kombination mit jeweiliger Kapitalausstattung in Energie für Endproduktproduzenten. Die Struktur des Energie- und Elektrizitätssektor ist an die Arbeit von Annicchiarico et al. (2017) angelehnt. Auf verschiedenen Stufen werden einzelne Energieträger kombiniert, um Energie zu erzeugen. Dies ermöglicht die Abbildung verschiedener Substitutionsmöglichkeiten zwischen den Energieträgern. Zur Energieerzeugung werden

die Energieträger Kohle, Öl, Erdgas, erneuerbare Energieträger und elektrische Energie herangezogen. Elektrizitätsunternehmen erzeugen elektrische Energie unter Einsatz derselben Energieträger (mit Ausnahme von elektrischer Energie) und bieten diese den Energieunternehmen und privaten Haushalten an. Wie bei den Energieunternehmen erfordert der Einsatz eines Energieträgers einen entsprechenden Kapitalstock.

Durch die optimale Wahl der Energie-, Kapital- und Arbeitsnachfrage produzieren Endproduktunternehmen Güter für die private und öffentliche Konsumnachfrage, die Investitions- und die Auslandsnachfrage. Darüber hinaus wählen sie das optimale Niveau an Weiterbildungsmaßnahmen für die MitarbeiterInnen und an Kapitalnutzung. In E-PuMA wird unvollkommene Substituierbarkeit zwischen den verschiedenen Ausbildungsgruppen in der Produktion angenommen. Wie in Jaag (2009) und Krusell et al. (2000) wird Kapital-Ausbildungs-Komplementarität unterstellt. Das bedeutet, dass Höherqualifizierte und der Kapitaleinsatz stärker zueinander komplementär sind (weniger einfach substituiert werden können) als dies bei Geringqualifizierten der Fall ist. Eine geringere Investitionstätigkeit ist damit mit einer schwächeren Produktivitäts- und Lohnentwicklung bei Personen mit höherer Qualifikation verbunden, womit sich auch die Anreize in Bildung zu investieren reduzieren. Endproduktproduzenten unterliegen monopolistischer Konkurrenz mit freiem Markteintritt: Jedes Unternehmen produziert eine eigene Marke, welche sich von den Konkurrenzprodukten unterscheidet. Die Nachfrage basiert auf Dixit-Stiglitz (1977) Präferenzen, wobei die einzelnen Marken unvollkommene Substitute darstellen.

Der Arbeitsmarkt wird im Rahmen eines Sucharbeitslosigkeitsmodells repräsentiert (vgl. Mortensen, 1986, und Mortensen und Pissarides, 1999). Dabei wird auf ein statisches Sucharbeitslosigkeitsmodell wie etwa bei Boone und Bovenberg (2002) zurückgegriffen, das die wesentlichen Einsichten des dynamischen Modells erlaubt. Unternehmen fragen Arbeit und Kapital für die Produktion nach. Der Arbeitsinput wird analog zu Jaag (2009) und nach den Ergebnissen von Ohanian et al. (2021) mit Hilfe einer dreistufigen CES-Produktionsfunktion weiter nach dem Ausbildungsniveau (gering, mittel, hoch) unterschieden. Die Endproduktunternehmen maximieren den Gegenwartswert ihrer Profite durch die optimale Wahl der ausgeschriebenen Stellen, die optimale Kündigungsentscheidung und die optimale Menge von firmenfinanziertem Training sowie das Ausmaß an Kapitaleinsatz sowie dessen Auslastung. Kapitalgüter werden von Investitionsgüterproduzenten bereitgestellt.

In E-PuMA ist die Bevölkerung in acht verschiedene Altersgruppen unterteilt, von welchen die ersten fünf Gruppen die Personen im erwerbsfähigen Alter umfassen, während die restlichen drei Gruppen die ältere Bevölkerung abbilden. Die fünfte Altersgruppe unterscheidet sich von den ersten vier Gruppen dahingehend, dass sie eine Mischgruppe darstellt, d.h. ein Teil dieser Gruppe ist noch erwerbstätig,

während der andere Teil bereits in Pension ist. Das Pensionsantrittsalter wird endogen von den Personen dieser Gruppe gewählt und passt sich bei Reformmaßnahmen oder strukturellen Änderungen an. Weiters wird eine Unterscheidung in drei unterschiedliche Ausbildungsniveaus vorgenommen, nämlich Geringqualifizierte (maximal Pflichtschulabschluss, ISCED 0-2), Individuen mit mittlerer Qualifikation (Lehrlinge, Absolventen einer mittleren bzw. höheren Schule etc., ISCED 3-4) und Hochqualifizierte ((Fach-)Hochschüler und Absolventen von Akademien). Personen mit höherer Qualifikation treten später in den Arbeitsmarkt ein als Personen mit geringerer Qualifikation, wodurch der notwendige zeitliche Aufwand für Bildung berücksichtigt wird.

Die gewählte Unterteilung in die verschiedenen Gruppen ermöglicht es, Individuen im Modell unterschiedliche Charakteristika zuzuweisen. Dazu gehören z.B. die Arbeitsproduktivität, um das Lohnprofil in Österreich gut nachbilden zu können und Investitionen in die Weiterbildung. Altersabhängige Charakteristika sind z.B. Sterbewahrscheinlichkeiten und Gesundheitsausgaben. Durch die Struktur des Modells kann die prognostizierte demographische Entwicklung abgebildet werden.

Das Einkommen der privaten Haushalte setzt sich aus dem Nettoarbeits-, dem Arbeitslosen-, dem Pensions- und dem Kapitaleinkommen, Abfertigungsansprüchen sowie aus den sonstigen Transfer- und Sachleistungen des Staates an die Haushalte zusammen. Gegeben, dass öffentliche Pensionsleistungen im Durchschnitt geringer als das vor Pensionsantritt erwirtschaftete Einkommen sind, sparen Erwerbstätige, um das Einkommen in höherem Alter durch Auflösung von Ersparnissen aufzustocken.

Die Individuen maximieren den Gegenwartswert ihres Nutzens (ihre Wertfunktion) durch die optimale Wahl ihres Arbeitseinsatzes (Arbeitszeit, Partizipation), ihrer Suchintensität nach einer Arbeitsstelle, ihrer Aus- und Weiterbildungsentscheidung und durch die optimale intertemporale Bestimmung der Sparquote sowie die Aufteilung der Konsumausgaben auf die Bereiche Verkehr, Raumklima, Strom und andere Konsumgüter. Beim Verkehr und Raumklima wird die Nachfrage weiter nach den wesentlichen Energieträgern unterschieden. Im Bereich Verkehr sind dies beispielsweise Benzin, Diesel und Strom. Der Arbeit von Varga et al. (2021) folgend werden dauerhafte Konsumgüter in den beiden Nachfragekategorien von „Leasingunternehmen“ gemietet.

Die Wahl des Arbeitseinsatzes ist abhängig vom Nettolohn und berücksichtigt zusätzlich generierte Ansprüche an die öffentlichen Sozialversicherungsträger (zukünftige Pensions- und Arbeitslosengeldansprüche) sowie Abfertigungsansprüche. Arbeitslose Individuen wählen die Intensität ihrer Suche nach einer Arbeitsstelle. Diese Entscheidung ist abhängig vom Nettoarbeitseinkommen, dem Arbeitsloseneinkommen und der Wahrscheinlichkeit, einen Arbeitsplatz zu finden. Unternehmen wählen eine optimale Anzahl an ausgeschriebenen offenen Stellen. Eine sogenannte *matching function* führt

Arbeitsuchende und offene Stellen zusammen. Zusätzlich treffen die Unternehmen eine Kündigungsentscheidung. Durch die Unterscheidung in einzelne Alters- und Ausbildungsgruppen kann E-PuMA alters- bzw. ausbildungsabhängige Arbeitslosenquoten abbilden. Die Wahl des Pensionsantrittsalters bzw. die Partizipationsentscheidung wird im Wesentlichen vom Nettoarbeitseinkommen und der Nettoersatzrate bzw. der sozialen Absicherung bestimmt. Die Aus- und Weiterbildungsentscheidungen hängen vor allem von der erwarteten Rendite von höherem Humankapital und den Kosten (inkl. Opportunitätskosten durch Verdienstentgang) ab.

Im öffentlichen Bereich werden Budgets für die soziale Sicherung und ein allgemeines Budget zur Finanzierung der öffentlichen Ausgaben unterschieden. Einnahmen der Sozialversicherungen bestehen aus Dienstnehmer- und Dienstgeberbeiträgen bzw. Transfers aus dem allgemeinen Budget. Ausgabenerhöhungen im Sozialversicherungsbereich können alternativ durch eine Erhöhung der Beitragssätze oder über zusätzliche Zuschüsse aus dem Budget finanziert werden.

Aus dem allgemeinen Budget werden die Ausgaben des Bundes und untergeordneter Gebietskörperschaften für den öffentlichen Konsum, für die Zuschüsse an die Sozialversicherungsträger und Transfers an die privaten Haushalte und Unternehmen und für den Zinsdienst der Staatsverschuldung über Einnahmen aus dem Steuersystem finanziert. Dabei werden alle wesentlichen Steuern des österreichischen Steuersystems (wie Lohn- und Einkommensteuer, Körperschaftsteuer, Konsumsteuern, Kapitalertragssteuern auf Zinsen und Dividenden und Lohnsummensteuern) explizit modelliert. E-PuMA bildet hierbei sowohl das progressive Einkommensteuersystem als auch das System der Sozialversicherung (inklusive Höchstbeitragsgrundlage) und weitere lohnabhängige Abgaben ab. Eine schematische Darstellung des E-PuMA-Modells findet sich in Abbildung 3.

Abbildung 3: Schematische Darstellung von E-PuMA

