



AUSTRIA
INSTITUT FÜR
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Wien, im Jänner 2024

ENDBERICHT

Wie viel Wachstum braucht es für die grüne Wende?

Studie im Auftrag von Oecolution

ENDBERICHT

Wie viel Wachstum braucht es für die grüne Wende?
November 2023

Prof. Dr. Monika Köppl-Turyna, Jonathan Steininger
Studie im Auftrag von Oecolution

EXECUTIVE SUMMARY

In der politischen Diskussion wird häufig argumentiert, dass eine „Schrumpfung“ oder „*Degrowth*“ der Ökonomie, d.h. eine Reduktion der wirtschaftlichen Aktivitäten, ein möglicher (oder gar der einzige) Weg zur Minderung von Treibhausgasemissionen sein könnte. Eine solche Strategie wäre allerdings nicht nur mit erheblichen sozialen Konsequenzen verbunden, z.B. wären wichtige Elemente des Sozialsystems nicht mehr finanzierbar, es ist ferner keineswegs sicher, dass eine solche Strategie tatsächlich zu Emissionsminderungen führen würde. Vielmehr zeigt die empirische Literatur, dass eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen nicht nur möglich ist, sondern dass Wachstum sogar eine Voraussetzung für sinkende Emissionen sein kann. Diese These wird in der sogenannten „*Environmental Kuznets Curve*“ (EKC) vertreten. Die Theorie zur EKC postuliert eine invers U-förmige Beziehung zwischen Emissionen und BIP (pro Kopf). In anderen Worten gehen in den entwickelten Ländern sinkende Emissionen Hand in Hand mit positiven BIP-Wachstumsraten.

Dieser Zusammenhang wird in der vorliegenden Studie anhand einer ökonometrischen Schätzung bestätigt. Es wurde aber festgestellt, dass die für eine vollständige Dekarbonisierung notwendigen Wachstumsraten sehr hoch ausfallen müssten. Um das Ziel einer Senkung der Emissionen um 41 Prozent bis 2040 zu erreichen, wäre demnach eine jährliche reale Wachstumsrate des BIP von 4,3 Prozent notwendig. Um im Jahr 2040 Klimaneutralität zu erreichen, benötigt es ein jährliches reales Wachstum von 7,4 Prozent.

Die Analyse zeigt, dass weitere Maßnahmen notwendig sind, um das Ziel der Dekarbonisierung zu erreichen. Die Empfehlungen, die sich aus den Ergebnissen ergeben, betreffen primär zwei Aspekte:

- Der erste betrifft die Frage, wie die wirtschaftliche Entwicklung befördert werden kann, wofür grüne Innovationen eine Grundlage bilden werden, und der zweite weitere wirtschaftspolitische Maßnahmen zur Unterstützung der Transformation.
- Dazu gehören insbesondere: Eine **verstärkte globale Kooperation**, wie Handel und ausländische Direktinvestitionen von Industrie- in Entwicklungsländer, verbunden mit dem Transfer von umweltfreundlichen Technologien, würde zur

Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung beitragen. Eine **Integration von Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels** (Bewusstseinsbildung, Aufbau von Kapazitäten, Anpassungsoptionen und Frühwarnsignale) auf den verschiedenen politischen Ebenen (inter- und supranational als auch regional). Eine **nachhaltige Industrialisierung**, die industrielle Wertschöpfung, Innovation, technologischen Fortschritt und wissenschaftliche Forschung und Entwicklung zusammenführt. Die **Nutzung von CO₂ als Ressource**: Die Abscheidung, Lagerung, Speicherung und Verwendung von CO₂ sind – auch unter dem Ressourcenaspekt – unverzichtbare Instrumente für das Erreichen der Klimaziele. Eine **rasche Ausweitung des europäischen Emissionshandels (ETS)** auf möglichst viele Bereiche der Volkswirtschaft, da der im ETS vorgesehene Mechanismus Anreize für einen schnelleren Umstieg schafft. **Reduktion der konsumbedingten Emissionen**: Der Konsum in europäischen Staaten wie Deutschland, Österreich und der Schweiz führt häufig zu mehr CO₂-Emissionen als die Länder selbst ausstoßen.

- Für die Verwendung von **Wasserstoff als Energieträger** bedarf es unter anderem eines Ausbaus der Netze, funktionierender regulatorischer Rahmenbedingungen, einer Diversifizierung der Wasserstoffquellen sowie einer Unterstützung von Investitionen in der Frühphase.
- Für die notwendige **Elektrifizierung der Gesellschaft** sind insbesondere der Ausbau erneuerbarer Energiequellen sowie der Netzinfrastruktur, eine flexiblere Anpassung von Energie-Angebot und -Nachfrage sowie eine Sicherstellung der Versorgung mit kritischen Rohstoffen von Bedeutung.
- **Mehr Risikokapital** um disruptive Innovationen zu forcieren durch eine **Sicherung der Nachfrage** nach grünen Technologien, eine Reform der **Mitarbeiterbeteiligung** oder der **Besteuerung von Carried Interest**, Entwicklung von **Spin-Off Strategien**, die sich an Best Practices innerhalb Europas orientieren, **indirekte (hybride) öffentliche Risikokapitalfinanzierung** durch Dachfondsmodelle sowie eine **öffentliche Kofinanzierung der Risikokapitalinvestitionen** unter Beibehaltung der privaten Risikoprofile und marktüblichen Konditionen, um so Verzerrungen am Markt zu verhindern und ein **Ausbau der kapitalgedeckten Altersvorsorge**, um somit auch Pensionskassen zu veranlassen, künftig höhere Summen in Risikokapital zu investieren

INHALT

| | |
|---|-----------|
| 1. Hintergrund und Motivation | 1 |
| 2. Die Umwelt-Kuznets-Kurve in der theoretischen und empirischen Literatur | 5 |
| 2.1. Theoretische Einordnung | 5 |
| 2.2. Internationale empirische Literatur | 8 |
| 2.3. Empirische Literatur für Österreich | 13 |
| 3. Schätzung der Umwelt-Kuznets-Kurve für Österreich | 16 |
| 3.1. Datenbeschreibung und Variablendefinitionen | 16 |
| 3.2. Empirisches Untersuchungsdesign | 22 |
| 3.3. Ergebnisse | 24 |
| 4. Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 32 |

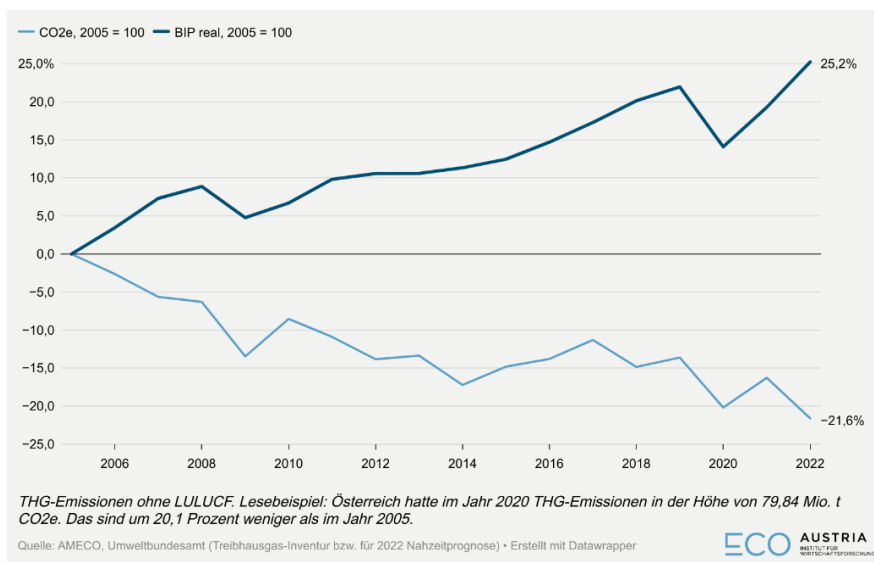
ABBILDUNGEN UND TABELLEN

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Entwicklung der Wirtschaftsleistung und der CO ₂ e-Emissionen in Österreich im Zeitverlauf | 1 |
| Abbildung 2: Entwicklung des realen BIP und der CO ₂ Emissionen in ausgewählten Ländern* | 2 |
| Abbildung 3: Entwicklung des realen BIP und der CO ₂ Emissionen in Österreich (Basisjahr 1990, konsum- und produktionsbasierte Emissionen) | 3 |
| Abbildung 4: Drei Phasen der Umwelt-Kuznets-Kurve | 7 |
| Abbildung 5 Resultierendes BIP-Wachstum mit Monte-Carlo-Simulationen bezüglich der Kontrollvariablen | 30 |
| <hr/> | |
| Tabelle 1: Ergebnisse von EKC-Studien für die EU zu CO ₂ -Emissionen (Teil 1) | 10 |
| Tabelle 2: Ergebnisse von EKC-Studien für die EU zu CO ₂ -Emissionen (Teil 2) | 11 |
| Tabelle 3: Zusammenstellung von Studien zur EKC-Hypothese (Sarkodie & Strezov, 2019) Teil 1 | 12 |
| Tabelle 4: Zusammenstellung von Studien zur EKC-Hypothese (Sarkodie & Strezov, 2019) Teil 2 | 13 |
| Tabelle 5: Schätzergebnisse für Österreich nach Wagner (2014) | 15 |
| Tabelle 6: Überblick der Studien zum Zusammenhang zwischen Bevölkerungsvariablen und Emissionen | 20 |
| Tabelle 7: Variablendefinitionen und Datenquellen | 22 |
| Tabelle 8: Ergebnis der Zeitreihen- und Panelregressionsschätzungen mit Time-Fixed-Effects | 25 |
| Tabelle 9: Ergebnis der Panelregressionsschätzungen mit länderspezifischen Trends | 27 |
| Tabelle 10: Ergebnis der gepoolten Schätzung | 28 |
| Tabelle 11: Notwendiges korrespondierendes durchschnittliches reales BIP-Wachstum bis 2040 | 30 |
| Tabelle 12: Hauptschätzungen mit pro-Kopf-Emissionen | 43 |
| Tabelle 13: Schätzungen mit länderspezifischen Trends und pro-Kopf-Emissionen | 44 |

1. HINTERGRUND UND MOTIVATION

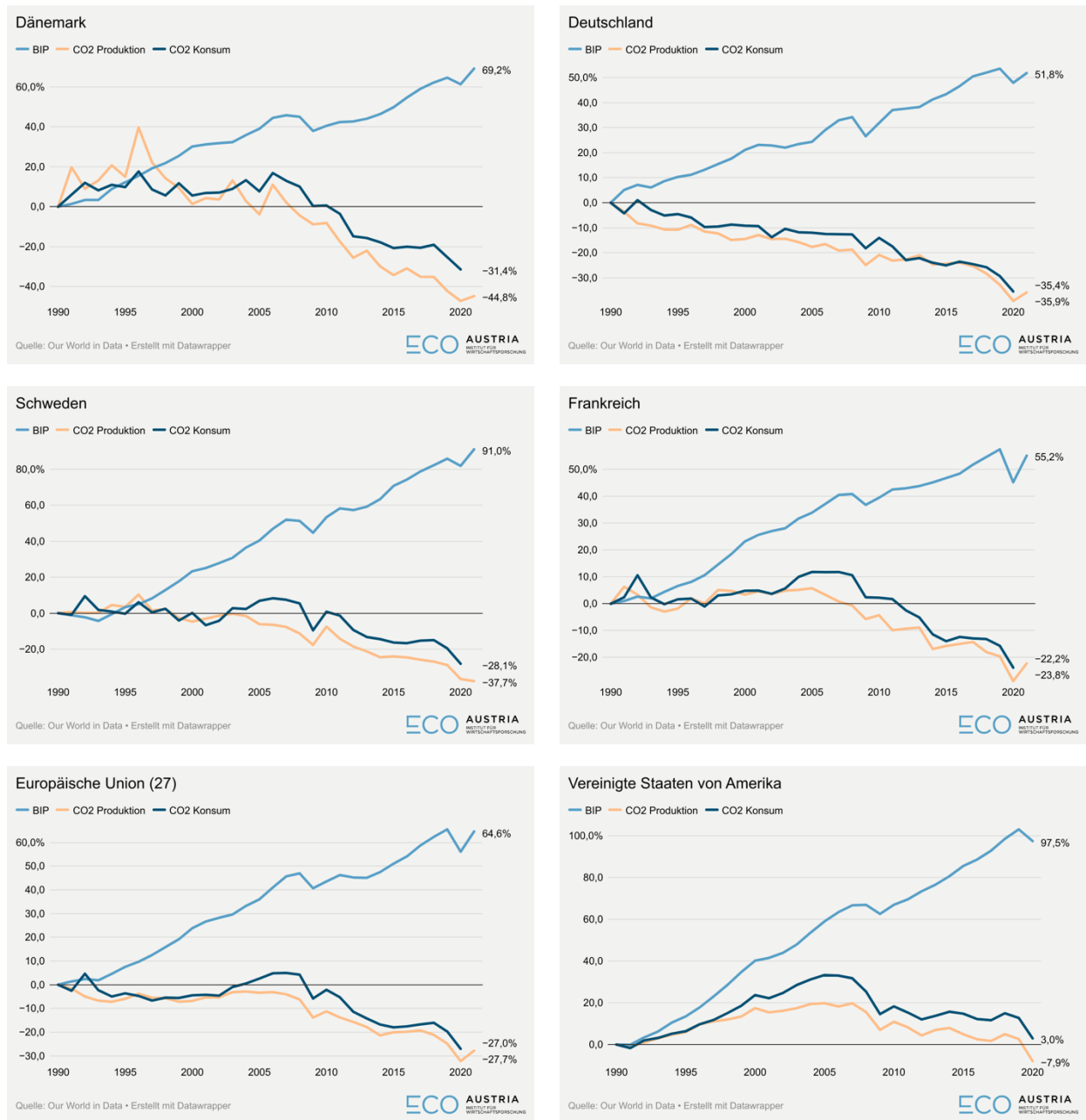
Der Klimaschutz und Maßnahmen zur Begrenzung des Klimawandels haben in den letzten Jahrzehnten sowohl auf multilateraler als auch auf nationaler Ebene an Bedeutung gewonnen. Auf der Pariser Klimakonferenz 2015 einigten sich 195 Staaten auf das Ziel, die Erderwärmung auf 1,5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Das Pariser Klimaschutzabkommen trat 2016 in Kraft. Vor dem Hintergrund der internationalen Vereinbarungen hat sich die EU 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. Auch wenn Österreich im internationalen Vergleich bereits eine überdurchschnittlich energieeffiziente Wirtschaft aufweist - so wurden im Jahr 2019 rund 4.380 Euro Bruttoinlandsprodukt (BIP, kaufkraftbereinigt) pro Tonne CO₂e erwirtschaftet, womit Österreich im europäischen Vergleich an siebter Stelle liegt - zeigt sich, dass die Reduktion der Emissionen relativ langsam voranschreitet (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Entwicklung der Wirtschaftsleistung und der CO₂e-Emissionen in Österreich im Zeitverlauf



Im Jahr 2022 lagen die Treibhausgasemissionen in Österreich um 21,6 Prozent unter jenen des Jahres 2005. Im Rahmen des Fit-for-55-Pakets, das für die EU ambitioniertere Ziele für 2030 vorsieht als vor diesem Paket geplant, ist auf Basis des vorliegenden Entwurfs für Österreich ein Reduktionsziel von 48 Prozent gegenüber 2005 vorgesehen. Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass eine Entkopplung der Emissionen von der Wirtschaftstätigkeit möglich ist. Diese Entwicklung zeigt sich auch in anderen entwickelten Ländern, teilweise sogar mit einer stärkeren Entkopplung als dies in Österreich der Fall ist (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Entwicklung des realen BIP und der CO₂ Emissionen in ausgewählten Ländern*

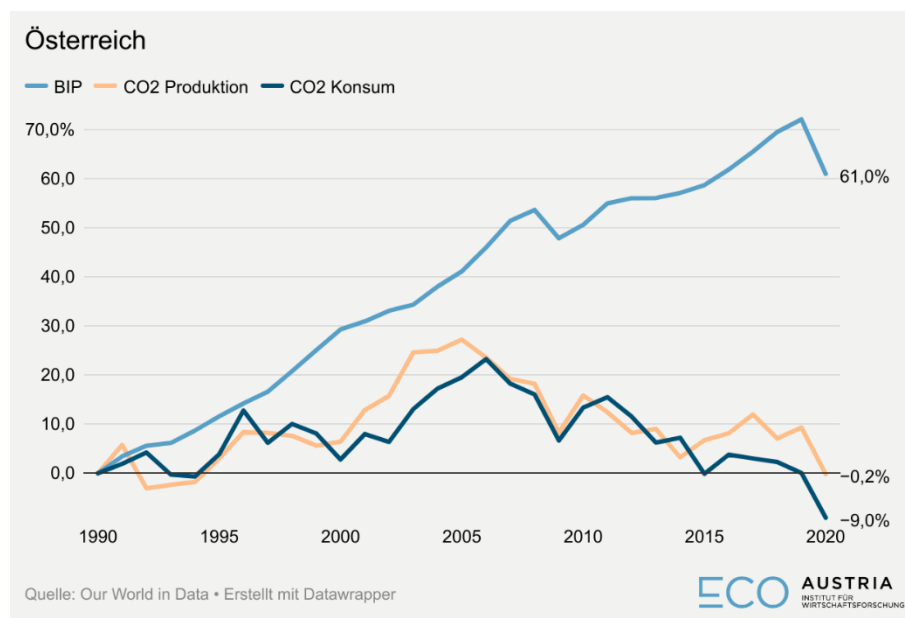


* Anmerkung: Die Werte für das BIP sind preisbereinigt. Produktionsbasierte Emissionen entsprechen der Logik der Treibhausgas-Inventur. Konsumbasierte Emissionen sind Emissionen, die um den Handel bereinigt wurden. Das heißt, dass Emissionen, die bei der Produktion von Gütern entstehen, dort zugeordnet werden, wo sie konsumiert werden (und nicht dort, wo die Produktion stattfindet). Landnutzungsänderungen sind nicht enthalten.

Wie Abbildung 2 zeigt, ist eine Entkopplung nicht nur für die Produktion, sondern auch für den privaten Konsum, der auch emissionsintensive Importe berücksichtigt, feststellbar. Die reale Wirtschaftsleistung in der Europäischen Union ist seit 1990 um fast 65 % gestiegen, während die Emissionen

in dieser Zeit um rund 27 % zurückgegangen sind. Eine Ausnahme unter den entwickelten Ländern sind die Vereinigten Staaten von Amerika, wo einerseits der Rückgang der Emissionen bescheiden, andererseits das reale Wirtschaftswachstum deutlich stärker als in der Europäischen Union ausgefallen ist. Auch in Österreich erfolgte die Entkopplung in dieser Betrachtung (mit dem Basisjahr 1990 und der Berücksichtigung der konsumbasierten Emissionen) langsamer als in anderen Ländern (Abbildung 3).

Abbildung 3: Entwicklung des realen BIP und der CO₂ Emissionen in Österreich (Basisjahr 1990, konsum- und produktionsbasierte Emissionen)



Dennoch wird in der politischen Diskussion mitunter argumentiert, dass eine „Schrumpfung“ bzw. „Degrowth“ der Ökonomie, d.h. eine Reduktion der wirtschaftlichen Aktivität, notwendig ist, um Emissionen deutlich zu reduzieren. Eine solche Strategie wäre allerdings nicht nur mit erheblichen sozialen Verwerfungen und ökonomischen Konsequenzen verbunden, da wesentliche Ausgaben des Sozialsystems wohl nicht mehr finanzierbar wären, sondern es ist auch zu hinterfragen, ob eine solche Strategie tatsächlich zu Emissionsminderungen führen würde. Moyer (2023) kommt in einer Simulation zu dem Ergebnis, dass mit einer Degrowth-Strategie auf globaler Ebene langfristig dramatische sozioökonomische Entwicklungen einhergehen. Ein globales Negativwachstumsszenario würde die zukünftigen kumulativen CO₂-Emissionen zwar erheblich reduzieren, das Erreichen globale Entwicklungsziele, wie die Beseitigung der Armut, aber dramatisch untergraben. Selbst in dem PolitikszENARIO, bei dem die sozialen Transferleistungen an die ärmere Bevölkerung global deutlich erhöht wird, führt das globale Negativwachstum bis zum Jahr 2100 zu einem Anstieg der weltweiten extremen Armut um 15 Prozentpunkte.

In der ökonomischen Literatur findet sich im Gegensatz zur Degrowth-Theorie, dass eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen nicht nur möglich ist, sondern dass Wachstum mitunter sogar eine Voraussetzung für rückläufige Emissionen sein kann. Diese These wird als „*Environmental Kuznets Curve*“ (EKC) bezeichnet. Die Theorie zur EKC postuliert eine invers U-förmige Beziehung zwischen dem BIP (pro Kopf) und Umweltverschmutzung bzw. Emissionen. Dinda (2004) fasst die bestehende Literatur zur EKC-Hypothese zusammen, Shahbaz und Sinha (2019) fokussieren speziell auf die Literatur bezüglich CO₂-Emissionen. Es zeigt sich mehrheitlich, dass der Zusammenhang zwischen BIP pro Kopf und CO₂-Emissionen durch eine inverse U oder inverse N Form beschrieben werden kann. Demnach steigen bei geringem Entwicklungs- bzw. Einkommensniveau die Emissionen pro Kopf mit zunehmender Wirtschaftsleistung, ab einem gewissen Entwicklungs- bzw. Einkommensniveau nehmen sie aber bei höherer Wirtschaftsleistung wieder ab. In einigen empirischen Studien wurde auch für Österreich ein solcher Effekt bzw. der beschriebene langfristig negative Zusammenhang zwischen BIP und Emissionen gefunden (siehe z.B. Bella et al., 2014). In diesem Zusammenhang ist auch die Unterscheidung zwischen produktions- und konsumbedingten Emissionen relevant, da die positiven Effekte in entwickelten Ländern primär bei der ersten Kategorie auftreten.¹ Darüber hinaus ist zu betonen, dass produktionsseitige Reduktionen der Treibhausgase zum Teil auch im Zusammenhang mit Veränderungen der Wirtschaftsstruktur (etwa kann die sogenannte Tertiärisierung, also die Verschiebung der Wirtschaftsaktivitäten vom Agrar- bzw. Industriesektor hin zu Dienstleistungen, Auswirkungen auf die Emissionen eines Landes haben) stehen (siehe beispielsweise Marsiglio et al., 2016).

In dieser Studie wird der Zusammenhang zwischen der Wirtschaftsleistung und den Emissionen untersucht und jenes Wachstumsniveau ermittelt, das mit den Fit-for-55-Zielen für Österreich in Einklang zu bringen ist.

¹ Produktionsbasierte Emissionen entsprechen der Logik der Treibhausgas-Inventur. Konsumbasierte Emissionen sind nationale Emissionen, die um den Handel bereinigt wurden. Das heißt, dass Emissionen, die bei der Produktion von Gütern entstehen, dort zugeordnet werden, wo sie konsumiert werden (und nicht dort, wo die Produktion stattfindet).

2. DIE UMWELT-KUZNETS-KURVE IN DER THEORETISCHEN UND EMPIRISCHEN LITERATUR

2.1. Theoretische Einordnung

Die Umwelt-Kuznets-Kurve (Environmental Kuznets-Curve - EKC) stellt einen Zusammenhang zwischen der Umweltverschmutzung und dem Einkommen, basierend auf der wirtschaftlichen Entwicklung einer Volkswirtschaft, dar. Daher wird eine EKC üblicherweise in drei Phasen unterteilt: eine frühe Phase der wirtschaftlichen Entwicklung mit steigender Umweltverschmutzung bei höherer Wertschöpfung, eine Phase, bei der sich Wirtschaftsleistung und Umweltverschmutzung entkoppeln (Wendepunkt²), und eine spätere Phase der wirtschaftlichen Entwicklung mit sinkender Umweltverschmutzung. Die Theorie führt mehrere Gründe dafür an, warum Umweltverschmutzung bzw. Emissionen mit der Wirtschaftsleistung bei geringem (hohem) Entwicklungsniveau positiv (negativ) gekoppelt sind.

In der Literatur finden sich zwei Interpretationen der EKC. In der ersten Interpretation wird die wirtschaftliche Entwicklung in zwei Phasen unterteilt, eine frühe und eine späte Phase. Die frühe Phase ist gekennzeichnet durch eine intensive Ressourcennutzung und eine abnehmende Regenerationsfähigkeit des Ökosystems. Damit ist ein zunehmender ökologischer Fußabdruck und eine zunehmende Umweltverschmutzung verbunden (Leal und Marques, 2022). Darüber hinaus ist die frühe Phase oft durch laxe Umweltvorschriften und einer geringen Zahlungsbereitschaft für den Umweltschutz gekennzeichnet (Dasgupta et al., 2002).

In der späteren Phase ist ein deutlich ausgeprägteres Umweltbewusstsein feststellbar, verbunden mit dem Einsatz sauberer Technologien und Innovationen. Darüber hinaus spielen in der späteren Phase zwei Effekte eine Rolle, nämlich der „Politikeffekt“ und der „Einkommenseffekt“ (Leal und Marques, 2022). Der Politikeffekt besteht in einer größeren Besorgnis der Öffentlichkeit über die Umweltbelange, die zu strengeren Umweltregulierungen führt. Der Einkommenseffekt besteht darin, dass die Einkommenssteigerung zu einer höheren Zahlungsbereitschaft für umweltfreundliche Produkte und Services führt (Sarkodie und Strezov, 2018).

Wie Lean und Marques (2022) weiter ausführen, kann die EKC in einer zweiten Interpretation im Zusammenhang mit der Bedeutung der einzelnen Wirtschaftssektoren gesehen werden, wobei eine Unterscheidung in drei Phasen erfolgt. Dies wird etwa in Kaika und Zervas (2013) oder Sarkodie und Strezov

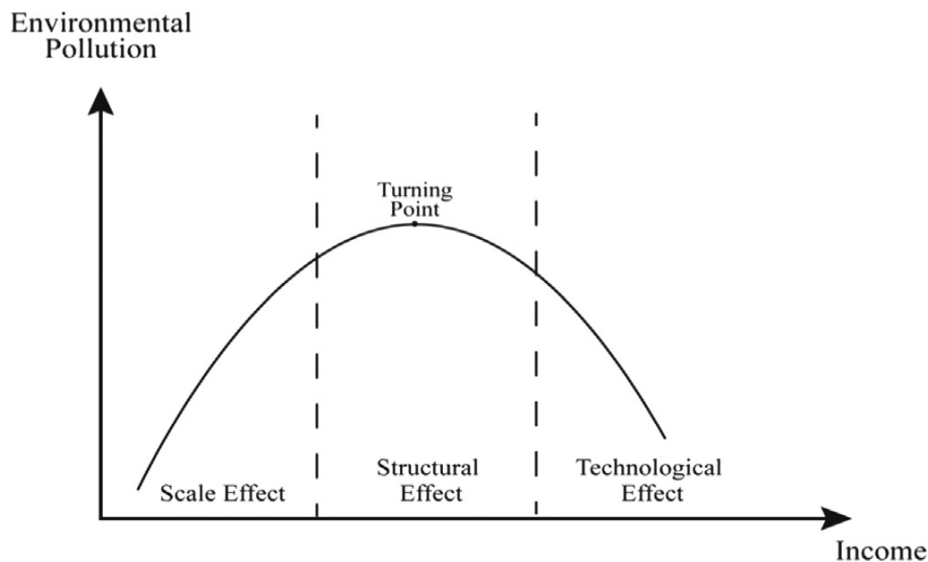
² Der englische Begriff "turning point" wird in diesem Zusammenhang - auch in dieser Studie - als "Wendepunkt" bezeichnet. Damit ist das Maximum der Funktion gemeint, die den Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Emissionen beschreibt, und nicht der mathematische Begriff Wendepunkt, der sich auf die Punkte einer Funktion bezieht, an denen die Krümmung der Funktion das Vorzeichen wechselt.

(2019) vorgenommen. Diese entsprechenden drei Phasen sind: (i) die vorindustrielle Wirtschaft, die hauptsächlich durch die hohe Bedeutung des Primärsektors und ein niedriges Einkommensniveau gekennzeichnet ist; (ii) die industrielle Wirtschaft, die mit einem ausgeprägten Sekundärsektor und einem mittleren Einkommensniveau verbunden ist; und (iii) die post-industrielle Wirtschaft, die auf einem bedeutenden tertiären bzw. Dienstleistungssektor und mit einem höheren Einkommensniveau beruht. Demnach ist die wirtschaftliche Tätigkeit in der vorindustriellen Wirtschaft begrenzt, was mit geringeren Abfallaufkommen verbunden ist. In dieser Phase führen mit höherem Wachstum der zusätzliche Einsatz von (umweltverschmutzenden) Technologien, fehlendes Umweltbewusstsein und die Priorisierung des Wirtschaftswachstums zu einer zunehmenden Umweltbelastung (Stern, 2018; Yandle et al., 2002). Die industrielle Wirtschaft ist durch eine immer intensivere Nutzung natürlicher Ressourcen und zunehmende Umweltverschmutzung gekennzeichnet. In dieser Phase zeigt sich auch ein positiver Zusammenhang zwischen Wirtschaftswachstum und Umweltverschmutzung, bevor der Wendepunkt erreicht wird. Die dritte Phase der wirtschaftlichen Entwicklung ist demnach durch einen Strukturwandel in der Wirtschaft hin zu informations- und technologieintensiven Branchen und einer dienstleistungsorientierten Wirtschaft gekennzeichnet. Dieser Wandel geht oft mit schärferen Umweltvorschriften, verstärktem Einsatz sauberer und effizienterer Technologien und einer Stärkung des Umweltbewusstseins einher, was zu einer Verringerung der Umweltverschmutzung führt (Stern, 2018).

Grossman und Krueger (1991) verdeutlichen, wie eine EKC zustande kommt. Sie argumentieren, dass Wirtschaftswachstum die Umweltqualität über drei wesentliche Kanäle beeinflusst: (i) den Skaleneffekt, (ii) den Struktureffekt und (iii) den technologischen Effekt (siehe Abbildung 4). Gemäß dem Skaleneffekt werden zu Beginn der wirtschaftlichen Entwicklung bei gegebenem (geringem) Technologieniveau mehr Ressourcen und Inputs zur Produktion von mehr Gütern eingesetzt. Daher führt die Ausweitung der wirtschaftlichen Entwicklung zu mehr Abfall und Schadstoffemissionen, und die Umweltqualität wird sich verschlechtern. Der Struktureffekt besagt, dass die Wirtschaft mit steigendem Einkommen einen Strukturwandel durchläuft und sich das Wirtschaftswachstum bei fortgesetztem Wachstum positiv auf die Umwelt auswirkt. Mit anderen Worten, wenn die Wirtschaftsleistung wächst, ändert sich die Struktur der Wirtschaft, und der Anteil der weniger umweltbelastenden Wirtschaftsaktivitäten nimmt allmählich zu. Außerdem erlebt die Wirtschaft oftmals einen Übergang von kapitalintensiven Industriesektoren zum Dienstleistungssektor und erreicht eine technologieintensive Wissenswirtschaft (die Endphase des Strukturwandels). Da technologieintensive Sektoren oftmals weniger natürliche Ressourcen verbrauchen, kann dies die Umweltverschmutzung reduzieren. Der letzte Kanal des Wachstumsprozesses ist jener des technologischen Effekts. Da eine einkommensstarke Wirtschaft mehr Ressourcen für Forschungs- und Entwicklungsausgaben bereitstellen kann, werden neue technologische Prozesse entstehen. So kann das

Land alte und schmutzige Technologien durch neue und saubere Technologien ersetzen, was die Umweltqualität verbessert (Bilgili, 2016).

Abbildung 4: Drei Phasen der Umwelt-Kuznets-Kurve



Quelle: Bilgili (2016).

Die empirische Literatur findet unterschiedliche Formen der Beziehung zwischen den Emissionen und dem Nationaleinkommen. Betrachtet man die folgende allgemeine Form:

$$CO_2 = \beta_1 \cdot GDP + \beta_2 \cdot GDP^2 + \beta_3 \cdot GDP^3 + \Delta \cdot X + u,$$

wo CO_2 die Emissionen, GDP das Bruttoinlandsprodukt (oder eine andere Variable, die das Volkseinkommen approximiert) und X weitere Kontrollvariablen darstellt, dann sind folgende Formen des Zusammenhangs möglich:

- Wenn $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$, gibt es keinen messbaren Zusammenhang zwischen CO_2 und GDP;
- Wenn $\beta_1 > 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$, ist der Zusammenhang linear und positiv;
- Wenn $\beta_1 < 0, \beta_2 = \beta_3 = 0$, ist der Zusammenhang linear und negativ;
- Wenn $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ und $\beta_3 = 0$, ist der Zusammenhang U-förmig;
- Wenn $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ und $\beta_3 = 0$, handelt es sich um die theoretisch vorhergesagte umgekehrt-U-förmige Environmental Kuznets Curve, bei der die Emissionen zuerst steigen und dann mit zunehmendem Einkommen wieder sinken;
- Wenn $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ und $\beta_3 < 0$, hat der Zusammenhang eine „umgekehrte N-form“ in der die Emissionen zuerst mit höheren Einkommen sinken, dann steigen und dann wieder sinken;
- Wenn $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ und $\beta_3 > 0$, hat der Zusammenhang eine „N-form“ in der die Emissionen zuerst mit den Einkommen steigen, dann sinken und dann wieder steigen.

Mehrere Faktoren beeinflussen die Form der Kurve. So wirken sich politische Entscheidungen, eine zu geringe Bewertung natürlicher Ressourcen und Subventionen für energieintensive Wirtschaftsstrukturen auf die Steigung der Kurve aus. Zudem beeinflussen der institutionelle Rahmen und die Governance, die Präferenzen der VerbraucherInnen und die Einkommensverteilung die Form der Kurve. Darüber hinaus wird die Bereitschaft der Politik, strengere Umweltvorschriften umzusetzen, als entscheidend für die Eindämmung der Umweltverschmutzung gesehen. Wenn Institutionen schwach, wenig effektiv oder korrupt sind, könnte dies die Form der Kurve beeinflussen und den Wendepunkt zu höheren Einkommensniveaus hin verschieben.

Der internationale Handel gilt als einer der wichtigsten Faktoren für die Form der EKC. Volkswirtschaften spezialisieren sich oftmals auf Sektoren, in denen sie bei einer Handelsliberalisierung einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Ländern haben. Wenn diese Sektoren einer schwachen Umweltregulierung unterliegen, führt die Handelsliberalisierung aufgrund der Zunahme von umweltschädlichen Aktivitäten zu mehr Umweltverschmutzung. Wenn die Einkommen deutlich zunehmen, kann dies zur Folge haben, dass strengere Umweltvorschriften umgesetzt werden, was wiederum zu einer Verlagerung der Produktion umweltintensiver Güter in andere Länder führt. Bei diesen Ländern handelt es sich dann in der Regel um einkommensschwache Länder mit einer laxeren Umweltgesetzgebung. Dieses Argument wird als "Pollution Haven Hypothesis" (PHH) bezeichnet. Die lockere Umweltgesetzgebung in Entwicklungsländern führt dazu, dass die Umweltverschmutzung in den entwickelten Volkswirtschaften abnimmt, während sie in den Entwicklungsländern zunimmt. Eine Kurve in Form eines umgekehrten U wird in diesem Zusammenhang durch zwei Phasen erreicht. Bei niedrigen Einkommen verursacht der Export von Gütern in ein entwickeltes Land die Steigung der Kurve (frühe Phasen der wirtschaftlichen Entwicklung). Danach bewirkt der Import von Gütern aus Entwicklungsländern (die nicht heimisch produziert werden) die fallende Kurve (spätere Stadien der wirtschaftlichen Entwicklung) (Leal und Marques, 2022). Dieser Zusammenhang ist allerdings nur für produktions-basierte Emissionen relevant, denn sofern man CO₂-Emissionen konsumbasiert erhebt und bemisst, werden energie-intensive Importe aus weniger entwickelten Ländern dem Importland zugerechnet und damit die PHH implizit in der Berechnung berücksichtigt.

2.2. Internationale empirische Literatur

Frodyma et al. (2022) bieten einen aktuellen Literaturüberblick über die Studien der letzten 20 Jahre über die EKC für CO₂-Emissionen für EU-Mitgliedstaaten – siehe Tabelle 1 und Tabelle 2. Studien, die sich methodisch auf Zeitreihendaten stützen, bestätigen großteils die Existenz einer länderspezifischen traditionellen EKC (also ein inverted-U), z. B. für Frankreich (Iwata et al., 2010; Ang, 2007), Kroatien (Ahmad

et al., 2017), das Vereinigte Königreich (Septhon und Mann, 2016), Rumänien (Shabaz et al., 2013) und für Spanien (Esteve und Tamarit, 2012; Balaguer und Cantavella, 2016). Darüber hinaus wurden Paneldaten für EU-Ländergruppen verwendet, um die traditionelle EKC zu testen (z. B. Bölük und Mert, 2014; Kasman und Duman, 2015; York, 2007). Es gibt auch Studien, in denen die traditionelle EKC erweitert auch auf N-Formen geprüft wurde (z. B. für Österreich Friedl und Getzner, 2003 oder das Vereinigte Königreich Fosten et al., 2012). In einigen Studien wurden keine Hinweise auf eine EKC gefunden.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Untersuchungen von unterschiedlichen Definitionen von Umweltverschmutzung (als abhängige Variable) ausgehen. Die meisten verwenden produktionsbasierte Emissionen (PBA), während konsumbasierte Emissionen (CBA) nur in sehr wenigen Arbeiten herangezogen werden (Khan et al., 2020a; Khan et al., 2020b; Ansari et al., 2020). Eine EKC-Analyse, die sowohl PBA- als auch CBA-Emissionen verwenden, findet sich in Dong et al. (2016). Es fehlen jedoch Arbeiten, die sowohl PBA- als auch CBA-Emissionen verwenden, um die EKC-Hypothese für die EU-Länder alleine zu überprüfen.

Tabelle 1: Ergebnisse von EKC-Studien für die EU zu CO₂-Emissionen (Teil 1)

| Authors | Country (period) | Environmental data | Control variables | Methodology | Shape of EKC |
|--------------------------------------|--|--|----------------------------------|--|---|
| Roca et al. (2001) [24] | Spain (1973–1996) | CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, SO ₂ , NO _x , NMVOC, CO ₂ | NUC, Coal, Thermal, Transport | OLS | Cubic: No EKC |
| Lindmark (2002) [45] | Sweden (1870–1997) | CO ₂ | | Kalman Filter | Quadratic: No EKC |
| Friedl and Getzner (2003) [23] | Austria (1960–1999) | CO ₂ | Temp, Import, VA | OLS | Linear, Quadratic, Cubic: Monotonically Increasing, N-shaped |
| Ang (2007) [44] | France (1960–2000) | CO ₂ | – | ARDL bounds, Johansen cointegration | Quadratic: Inverted U-shaped |
| York (2007) [46] | 14 EU countries (1960–2000) | EC | POP, POP. 65+, URB | Prais-Winsten regression | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Acaravci and Ozturk (2010) [43] | 19 European countries (1960–2005) | CO ₂ | EC | ARDL bounds | Quadratic: Inverted U-shaped (Denmark, Italy), No EKC |
| [26] Iwata et al., (2010) | France (1960–2003) | CO ₂ | NUC, TR, EC, URB | ARDL bounds | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Esteve and Tamarit (2012a) [25] | Spain (1857–2007) | CO ₂ | – | Cointegration with structural breaks | Linear: No EKC |
| Esteve and Tamarit (2012b) [56] | Spain (1857–2007) | CO ₂ | – | Threshold Cointegration | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Fosten et al. (2012) [40] | The UK (1830–2003) | CO ₂ , SO ₂ | EP | OLS | Cubic: N-shaped |
| Zanin and Marra (2012) [29] | 9 countries (1960–2008) | CO ₂ | | Additive mixed model | Mixed models: various results |
| Shahbaz et al. (2013) [47] | Romania (1980–2010) | CO ₂ | EC | ARDL bounds | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Böök and Mert (2014) [18] | 16 EU countries (1990–2008) | GHG | REC, FF | Panel regression | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Lapinskiene et al. (2014) [41] | 27 EU countries (1995–2010) | GHG | R&D, ET, EC | OLS | Cubic: Inverted U-shaped U-shaped Monotonically Increasing |
| López-Menéndez et al. (2014) [31] | 27 EU countries (1996–2010) | GHG | – | Random Effect, Fixed Effect, Fixed & Time Effect | Cubic: various results |
| Piatowska et al. (2014) [27] | Poland (2000–2012) | GHG | EC | TAR, M-TAR | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Baek (2015) [49] | 7 Arctic countries (1960–2010) | CO ₂ | EC | ARDL bounds | Linear, Quadratic, Cubic: Monotonically Decreasing (Denmark, Finland), No EKC (Sweden) |
| Kasman and Duman (2015) [20] | 15 EU Member countries (1992–2010) | CO ₂ | EC, TR, URB | FMOLS | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Ahmed et al. (2016) [57] | 24 European countries (1980–2010) | CO ₂ | – | ARDL | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Al-Mulali et al. [58] | Central, East, and West Europe (1980–2010) | EF | RE, URB, TR | DOLS | Quadratic: No EKC |
| Balaguer and Catavella (2016) [59] | Spain (1874–2011) | CO ₂ | OP | ARDL bounds | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Dong et al. (2016) [37] | 189 countries (1990–2012) | CO ₂ (PBA, CBA) | – | OLS, Fixed effect, Random effect, GMM, CMG, AMG | Cubic, Quadratic, Linear: Various results |
| Sephton and Mann (2016) [60] | The UK (1830–2003) | CO ₂ , SO ₂ | – | OLS | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Abid (2017) [61] | 41 EU countries (1990–2011) | CO ₂ | INF, EDUC, GFCF, PE, FD, FDI, TR | Panel GMM | Cubic: Various results |
| Ahmad et al. (2017) [28] | Croatia (1992–2011) | CO ₂ | | ARDL bounds | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Jaforullah and King (2017) [53] | 7 countries (1960–2010) | CO ₂ | EC | ARDL bounds | Quadratic, Cubic: Various results |
| Piatowska and Włodarczyk (2017) [62] | CEE countries (1995–2012) | CO ₂ | EC | T-ECM, M-TECM | Quadratic: Inverted U-shaped (Czechia, Hungary, Slovakia), U-shaped (Bulgaria, Latvia, Lithuania, Poland) |
| Arango-Miranda et al. (2018) [48] | 10 countries (1971–2014) | ffCO ₂ | EC, ExC, TR | OLS | Linear: No EKC |
| Destek et al. (2018) [21] | 15 EU countries (1980–2013) | EF | REC; N-REC; TR | Panel MG-FMOLS; MG-DOLS; DCCE-MG | Cubic U-shaped |
| Piatowska and Włodarczyk (2018) [63] | 14 EU Member countries (1992–2010) | CO ₂ | EC | T-ECM M-TECM | Quadratic, Cubic: Various results |

Quelle: Frodyma et al (2022).

Tabelle 2: Ergebnisse von EKC-Studien für die EU zu CO₂-Emissionen (Teil 2)

| Authors | Country (period) | Environmental data | Control variables | Methodology | Shape of EKC |
|------------------------------------|---|--|---|---|--|
| Sterpu et al. (2018) [32] | 16 EU countries (1990–2016) | GHG | EC, REC | Panel data techniques Heterogeneous regression | Cubic: N-shaped Quadratic: Inverted U-shape (11 countries), No EKC (17 countries) |
| Urban and Nordensvärd (2018) [30] | Nordic countries (1960–2015) | CO ₂ | EC | Descriptive statistics | Quadratic: Inverted U-shaped |
| Lazăr et al. (2019) [22] | CEE countries (1996–2015) | CO ₂ | EC, ECFR | MG, MG-FMOLS, AMG | Cubic: N-shape |
| Altıntans and Kassouri (2020) [64] | 14 European (1990–2014) | CO ₂ , EF | – | heterogeneous panel model | Quadratic: Various results |
| Ansari et al. (2020) [36] | top CO ₂ emitters (1971–2013) | CO ₂ | EC; TR | ARDL | Quadratic: Inverted U-shaped in the USA, other countries No EKC |
| Dogan and Inglesi-Lotz (2020) [65] | EU countries (1980–2014) | CO ₂ | ES; EI; URB; POP | OLS, FMOLS, STIRPAT | Quadratic: economic growth: inverted U-shaped; industrial: U-shaped |
| Kacprzyk and Kuchta (2020) [66] | 161 countries (1992–2012) | Panel CO ₂ | – | Fixed effect | Quadratic: Various results |
| Jóźwik et al. (2021) [34] | Central European countries (1995–2016) | CO ₂ | EC; TR | ARDL | Quadratic: Inverted U-shaped for Poland; other countries no EKC |
| Katenci (2021) [67] | 15 European countries (1960–2015) | CO ₂ | EC; TR | DOLS | Quadratic: U-shape for each country |
| Kotroni et al. (2020) [68] | Greece (1960–2014) | CO ₂ | EC; URB | VAR | Quadratic: U-shape |
| Madaleno and Moutinho (2021) [69] | EU 15 (Old Europe) and the EU 12 (New Europe) (2008–2018) | GHG; CO ₂ ; N ₂ O; CH ₄ | labor force, energy use, electricity production | Panel dynamic fixed effects (DFE), DOLS, FMOLS | Quadratic: U-shaped |
| Saqib and Benhmad (2021) [70] | 22 EU countries (1995–2015) | EF | EC; POP | DOLS, FMOLS | Quadratic: Inverted U-shaped |

Note: OLE - Ordinary Least Square; ARDL - Autoregressive Distributed Lag; TAR - Threshold Autoregressive; M-TAR - Momentum Threshold Autoregressive; FMOLS - Fully Modified Ordinary Least Square; GMM - Generalized Method of Moments; CMG - Common Correlated Effects Mean Group; AMG - Augmented Mean Group; T-ECM - Threshold Error Correction Model; M-TECM - Momentum Threshold Error Correction Model; MG - Mean Group; MG-FMOLS - Mean Group Fully Modified Least Squared; CO₂ - carbon dioxide; CH₄ - methane; N₂O - nitrous oxide; SO₂ - sulphur dioxide; NO_x - nitrogen oxide; NMVOC - non-methane volatile organic compounds; NUC - nuclear power; Coal - share of coal in total primary energy; Thermal - electricity generated in conventional thermal power station; Transport - consumption of energy of the transport sector; Temp - deviation from long-term mean temperature; Import - nominal ratio to GDP (%); VA - value added in the service sector (tertiary sector), nominal ratio to GDP (%); EC - energy consumption; POP - population; POP 65+ - percentage of the population over 64 years of age; URB - urbanization; TR - trade; EP - energy prices; REC - renewable energy consumption; FF - fossil fuel; R&D - Research and experimental development; ET - Ratio of energy tax revenues to the final energy consumption; OP - oil prices; ffCO₂ - CO₂ from fossil fuels; ExC - Exergy consumption; ECFR - log of the index of economic freedom of Heritage Foundation; EF - ecological footprint; INF - inflation; EDUC - education; GFCF - gross fixed capital formation; PE - public expenditure; FD - domestic credit to the private sector which is an indicator of financial development; FDI - Foreign direct investment; RE - electricity production from renewable sources.

Quelle: Frodyma et al (2022).

Saqib und Benhmad (2021) haben eine Metaanalyse von 101 Studien der Jahre 2006 bis 2019 vorgenommen und eine starke Evidenz für das Vorhandensein einer EKC gefunden. Es wurde festgestellt, dass es sich bei dieser Beziehung um ein langfristiges Phänomen handelt, das weder von der Wahl der verwendeten ökonomischen Methoden noch von den verwendeten Daten abhängt, obwohl die Ergebnisse in gewissem Maß je nach Wahl der Indikatoren für die Umweltbelastung variieren. 57 Prozent aller Ergebnisse der Literatur bestätigen die empirische Validität der EKC-Hypothese, dass also die Umweltverschmutzung (ab einer gewissen Einkommenshöhe) mit höherer Wirtschaftsleistung abnimmt.

Sarkodie und Strezov (2019) führen eine Meta-Analyse sowie eine bibliometrische Analyse durch. Eine Zusammenstellung der berücksichtigten Studien findet sich in Tabelle 3 und Tabelle 4.

Tabelle 3: Zusammenstellung von Studien zur EKC-Hypothese (Sarkodie und Strezov, 2019) Teil 1

| Reference | Location | Period | Data series & method | Results & interpretation |
|----------------------------|------------------------------|-----------|---|---|
| Acaravci and Ozturk (2010) | 19 European countries | 1960–2005 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using autoregressive distributed lag bounds test. | The EKC hypothesis is invalid, however, there is unidirectional causality from economic growth to CO ₂ emissions. The study found a positive long-run relationship between CO ₂ emissions and energy consumption. |
| Ahmad et al. (2016) | India | 1971–2014 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using panel vector autoregression and Granger causality test. | The EKC hypothesis is invalid India. The growth rate of CO ₂ emissions is dependent on energy consumption. In a disaggregated level, coal energy source contributes more to pollution than natural gas energy source. |
| Alam et al. (2011) | India | 1971–2006 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using multivariate Toda and Yamamoto model, Impulse-Response and Granger causality test. | No EKC hypothesis. The study found a feedback hypothesis between CO ₂ emissions and energy consumption but no causal relationship between energy consumption and economic growth. |
| Antonakakis et al. (2017) | 106 countries | 1971–2011 | Economic growth, energy consumption and CO ₂ emissions using panel vector autoregression and Impulse-Response. | The EKC hypothesis is not valid. The study found a feedback hypothesis between energy consumption and economic growth. |
| Apergis and Payne (2009) | 6 Central American countries | 1971–2004 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using a panel vector error correction model. | The EKC hypothesis is valid. There is a long-run relationship between energy consumption and CO ₂ emissions. The Granger causality test reveals a unidirectional causality running from energy consumption to output and a bidirectional causality between CO ₂ emissions and energy consumption. |
| Cole (2004) | OECD countries | 1980–1997 | Air pollutants, water pollutants, the share of manufacturing, exports, and trade openness using fixed and random effects. | Confirmed the EKC hypothesis in higher income countries. The inverted-U shaped relationship is somewhat associated with the demand for environmental regulation and increased investment in pollution abatement technologies. |
| Fei et al. (2011) | China | 1985–2007 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using ordinary least squares regression. | No EKC hypothesis. There is a long-run relationship between energy consumption and economic growth. The study revealed a positive impact of economic growth of pollution. |
| Fodha and Zaghdoud (2010) | Tunisia | 1961–2004 | CO ₂ emissions, sulphur dioxide, and GDP using the vector error correction model. | The EKC hypothesis is valid between sulphur dioxide and GDP at a turning point of US\$ 1200. A monotonic relationship between CO ₂ emissions and GDP is revealed. |
| Heidari et al. (2015) | Five ASEAN countries | 1980–2008 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using panel smooth transition regression. | Invalid EKC hypothesis in ASEAN countries. Energy consumption increases CO ₂ emissions even in regime changes compared to economic growth that increases CO ₂ emissions in the first regime. |
| Hu et al. (2018) | 25 developing countries | 1996–2012 | CO ₂ emissions, GDP per capita, commercial services per capita, the share of renewable energy, size of renewable consumption per capita using fully-modified ordinary least squares & dynamic ordinary least squares regression. | No EKC hypothesis. The study found a positive impact of economic growth on renewable and vice versa. The negative role of renewable on CO ₂ emissions was confirmed. |
| Jalil and Mahmud (2009) | China | 1975–2005 | Energy consumption, economic growth, trade and CO ₂ emissions using autoregressive distributed lag bounds test. | The EKC hypothesis is valid. The Granger causality reveals a unidirectional causality running from economic growth to CO ₂ emissions. The main determinants of CO ₂ emissions are economic growth and energy consumption. |
| Jaunky (2011) | 36 high-income countries | 1980–2005 | Economic growth and CO ₂ emissions using generalized method of moments and vector error correction model. | The EKC hypothesis is valid. There is a unidirectional causality running from economic growth to CO ₂ emissions. |
| Kais and Sami (2016) | 58 countries | 1990–2012 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using generalized method of moments. | The study found the existence of the EKC hypothesis in 58 countries and confirm a positive long-run relationship between economic growth and CO ₂ emissions. |
| Lean and Smyth (2010) | Five ASEAN countries | 1980–2006 | CO ₂ emissions, energy consumption and per capita GDP using panel dynamic ordinary least squares regression. | The EKC hypothesis is valid. A unidirectional causality running from CO ₂ emissions to energy consumption is valid in the short-run. |
| Narayan and Narayan (2010) | 43 developing countries | 1980–2004 | Economic growth and CO ₂ emissions using panel cointegration. | No EKC hypothesis. The study revealed that 15 of 43 countries decline pollution at long-run income levels. |
| Saboori et al. (2016) | Malaysia | 1980–2009 | Economic growth and CO ₂ emissions using autoregressive distributed lag. | The EKC hypothesis is valid, thus, inverted U-shape between CO ₂ emissions and economic growth. The study found a long-run equilibrium relationship between economic growth and CO ₂ emissions. |
| Sarkodie (2018) | 17 African countries | 1971–2013 | CO ₂ emissions, birth rate, energy consumption, fertility rate, per capita GDP, agriculture, and ecological footprint using fixed and random effects, Utest, and Westerlund error-correction model. | Confirmed the validity of EKC hypothesis at a turning point of US\$5702. A unidirectional causality running from economic development to environmental degradation was established. |
| Wang et al. (2016) | China | 1990–2012 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using vector error-correction, Impulse-Response and Granger causality test. | No EKC hypothesis. The study found a unidirectional causality running from energy consumption to CO ₂ emissions and a feedback hypothesis between economic growth and energy consumption. |

Quelle: Sarkodie und Strezov (2019).

Tabelle 4: Zusammenstellung von Studien zur EKC-Hypothese (Sarkodie und Strezov, 2019) Teil 2

| Reference | Location | Period | Data series & method | Results & interpretation |
|-------------------------|---|-----------|---|---|
| Yang and Zhao (2014) | India | 1970–2008 | Energy consumption, economic growth and CO ₂ emissions using Granger causality test and directed acyclic graphs. | No EKC hypothesis. The study found a unidirectional causality running from energy consumption to CO ₂ emissions and a feedback hypothesis between CO ₂ emissions and economic growth. |
| York et al. (2003) | 142 countries | 1996 | Human ecology, modernization and political economy variables using the Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology (STIRPAT) model. | Age-structure of the population has environmental impacts. Confirmed the validity of the EKC hypothesis. Institutional change improves ecological sustainability. |
| Zaman and Moemen (2017) | 90 countries from low (\$995 or less), middle-income (\$996–12,055), and high-income (\$12,056 or more) countries | 1975–2015 | Energy consumption, economic growth, service value added and CO ₂ emissions using the generalized method of moments. | The study confirms the EKC hypothesis in low and middle-income countries. Increasing levels of energy consumption appear to facilitate the growth of environmental pollution. Service value added increases CO ₂ emissions in the long term. |

Quelle: Sarkodie und Strezov (2019).

Die Analyse der 17 berücksichtigten Arbeiten ergab insgesamt 43 Ergebnisse, die die Gültigkeit der EKC-Hypothese bestätigen, während 20 Ergebnisse die EKC-Hypothese ablehnen. Die Meta-Analyse zeigt mit hoher statistischer Signifikanz die Existenz eines inversen-U-Zusammenhanges (mit einem Wendepunkt bei einem BIP pro Kopf von knapp 9.000 USD).

2.3. Empirische Literatur für Österreich

Die Studie von Frodyma et al. (2022) analysiert die Umwelt-Kuznets-Kurve (EKC) unter Verwendung eines ARDL-Modells (um die Heterogenität zwischen den betrachteten Ländern zu berücksichtigen) und einer kubischen Definition des BIP. Die Autoren, die unter anderem Österreich untersuchen, verwenden sowohl produktions- als auch konsumbasierte Emissionen als abhängige Variable und untersuchen den Zeitraum von 1970 bis 2017. Im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen konnten Frodyma et al. (2022) unabhängig von der BIP-Spezifikation (kubisch, quadratisch, linear) in den meisten Ländern keine EKC nachweisen. Nur in 11 (von 168 betrachteten) Fällen zeigt die Studie eine langfristige Beziehung zwischen Wirtschaftswachstum und Emissionen im Sinne einer EKC, auch in Österreich. Österreich weist ein besonderes Muster bei den konsumbedingten CO₂-Emissionen (CBA) auf, und zwar einen umgekehrt N-förmigen Zusammenhang. Das heißt in anderen Worten, dass zwei Wendepunkte gefunden werden konnten: die Emissionen sanken demnach bis zu einem BIP pro Kopf von 23,560 USD (in 2010 USD) und steigen danach wieder an. Das Maximum wird bei einem Niveau von knapp 44,000 USD erreicht, darüber hinaus sinken die Emissionen mit steigendem BIP pro Kopf in Österreich. Dieses Niveau entspricht umgerechnet etwa Österreichs BIP pro Kopf des Jahres 2004, das heißt 29.670 EUR.

Churchill et al. (2018) testen die Hypothese der Umwelt-Kuznets-Kurve (EKC) für ein Panel von 20 OECD-Ländern, mit Daten, die bis zur ersten Globalisierungswelle im 19. Jahrhundert zurückreichen. Unter Verwendung neu entwickelter Schätzmethoden für Paneldaten, die Querschnittsabhängigkeit und Heterogenität von Parametern berücksichtigen, finden sie für den Zeitraum von 1870 bis 2014 Unterstützung für die EKC-Hypothese für das Panel als Ganzes, mit Wendepunkten im Pro-Kopf-

Einkommen, die zwischen 18.955 USD und 89.540 USD (in 1990 USD) liegen. Die länderspezifischen Ergebnisse stützen die EKC-Hypothese in unterschiedlichem Ausmaß. Für neun der 20 Länder finden die Autoren Hinweise auf Wendepunkte, wobei fünf Länder eine traditionelle umgekehrt U-förmige Beziehung, drei Länder eine N-förmige und ein Land eine umgekehrt N-förmige Beziehung aufweisen. Für Österreich wurde in dieser Analyse kein Zusammenhang zwischen Einkommen und CO₂-Emissionen gefunden.

Unter Verwendung von Daten zu den Pro-Kopf-CO₂-Emissionen und zum realen BIP-pro-Kopf für fünfzehn Länder, die den Zeitraum 1960-2013 abdecken, testet Apergis (2016) die Gültigkeit der Umwelt-Kuznets-Kurve, indem er sowohl panel- als auch zeitreihen-basierte methodische Ansätze der Kointegration verwendet. Da die EKC-Hypothese in ihrer üblichen Form eine umgekehrt U-förmige Beziehung zwischen Emissionen und Produktion postuliert, wird in der Studie auf Kointegration zwischen den CO₂-Emissionen pro Kopf, dem realen BIP-pro-Kopf und den quadrierten Werten des realen BIP-pro-Kopf getestet. Auf der Grundlage mehrerer Spezifikationen, einschließlich des Quantil-Kointegrationsansatzes, kommt der Autor zu dem Ergebnis, dass die EKC-Hypothese in 12 der 15 Ländern - darunter auch in Österreich - zutrifft.

Bilgili et al. (2016) untersuchen eine etwas angepasste Umwelt-Kuznets-Kurve (EKC)-Hypothese mit möglichen Auswirkungen des Verbrauchs erneuerbarer Energien auf die Umweltqualität. Zu diesem Zweck zielt das Papier darauf ab, die Gültigkeit der EKC-Hypothese unter Verwendung der abhängigen Variable CO₂-Emissionen und der Regressoren BIP, quadratisches BIP und Verbrauch an erneuerbaren Energien zu untersuchen. Die Autoren verwenden einen Paneldatensatz über 17 OECD-Länder für den Zeitraum 1977-2010 und führen Panel-FMOLS- und Panel-DOLS-Schätzungen durch. Die Ergebnisse unterstützen die EKC-Hypothese für das Panel und zeigen, dass das BIP-pro-Kopf und das quadrierte BIP-pro-Kopf positive bzw. negative Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen haben und dass der Verbrauch erneuerbarer Energien negative Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen hat. Für Österreich jedoch unterscheidet sich die empirisch festgestellte Form des Zusammenhangs je nachdem, welchen Schätzer die AutorInnen anwenden: für die FMOLS Schätzung finden sie eine U-förmige Kurve, für die DOLS-Schätzung eine „klassische“ EKC (deren Koeffizienten allerdings nicht statistisch signifikant sind).

Wagner (2015) findet wiederum eine Bestätigung der EKC-Hypothese für Österreich. Er testet diese anhand von Daten für 19 früh-industrialisierte Länder im Zeitraum 1870 bis 2000 und betrachtet Kohlendioxid- (CO₂) und Schwefeldioxid (SO₂)-Emissionen und das reale BIP pro Kopf. Der Autor kommt zu dem Ergebnis, dass die empirischen Belege der EKC-Hypothese möglicherweise schwächer sind als angenommen. Für Österreich findet der Autor aber eine Bestätigung der invertierten U-Form. Die geschätzte Gleichung ist

$$e_t = c + \delta_t + \beta_1 * y_t + \beta_2 * y_t^2 + \sum_{j=-k_1}^{k_2} \gamma_j \Delta y_{t-j} + u_t,$$

wo die Parameter β_1 und β_2 die Koeffizienten der EKC sind. Je nach Spezifikation findet der Autor unterschiedliche Wendepunkte (siehe Tabelle 5). Die hohe Variabilität der geschätzten Wendepunkte sollte auch im Kontext der statistischen Signifikanz betrachtet werden: für die FM-OLS Schätzung, die den bei weitem höchsten Wendepunkt aufweist, ist der quadratische Term nicht signifikant. Der Autor selbst lässt eine Präferenz für die Schätzung der Stichprobe von 1955 bis 2000 erkennen, die in einem Wendepunkt von 35.052 EUR resultiert.

Tabelle 5: Schätzergebnisse für Österreich nach Wagner (2014)³

| | $\hat{\delta}$ | $\hat{\beta}_1$ | $\hat{\beta}_2$ | TP |
|------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------|
| OLS | -0.014 (-2.578) | 7.124 (2.259) | -0.335 (-1.962) | 40,924 |
| FM-Lin | -0.017 (-3.967) | 9.010 (3.021) | -0.433 (-2.592) | 32,717 |
| D-Lin | -0.026 (-5.550) | 18.983 (4.418) | -0.962 (-4.119) | 19,260 |
| FM-OLS | -0.012 (-2.650) | 5.070 (1.662) | -0.226 (-1.320) | 75,262 |
| D-OLS | -0.015 (-3.241) | 7.481 (2.185) | -0.354 (-1.856) | 39,153 |
| 1955-2000 ⁴ | | | | 35,052 |

³ t-Werte in Klammern.

⁴ Für diese Schätzung liegt nur eine Kurzbeschreibung sowie der Wert des Wendepunktes im Text vor, ohne die Details der Analyse.

3. SCHÄTZUNG DER UMWELT-KUZNETS-KURVE FÜR ÖSTERREICH

3.1. Datenbeschreibung und Variablendefinitionen

Für die empirische Schätzung der Umwelt-Kuznets-Kurve in der vorliegenden Studie werden verschiedene Datenquellen verwendet. Dabei werden diverse Kontrollvariablen herangezogen, die in der Literatur in Zusammenhang mit CO₂-Emissionen gebracht wurden. Üblicherweise können vier Arten der Messung verschiedener Schadstoffe unterschieden werden:

- Emissionen pro Kopf,
- Emissionen pro Bruttoinlandsprodukt (Verschmutzungsintensität),
- Verschmutzungsgrade in der Umwelt (Konzentrationen; Auswirkungen auf ein bestimmtes Gebiet) und
- Gesamtemissionen.

In länderübergreifenden Studien sind die Pro-Kopf-Emissionen der am häufigsten verwendete Indikator für den CO₂-Ausstoß. Es sprechen jedoch auch Gründe für die Relevanz von Gesamtemissionen. Erstens beziehen sich die Reduktionsziele von Klimaabkommen bzw. den europäischen Zielsetzungen auf prozentuale Verringerungen der jährlichen THG-Emissionswerte (und nicht auf Verringerungen der Pro-Kopf-Emissionen oder der Emissionen pro Produktionseinheit). Zweitens können, wie in verschiedenen Studien (etwa Tisdell, 2001) gezeigt wurde, die Gesamtemissionen auch dann noch steigen, wenn die Emissionen pro Einheit abnehmen. Aus diesem Grund macht es in dem Kontext dieser Studie Sinn, die Gesamtemissionen zu betrachten. Die Unterschiede in der Varianz könnten jedoch die Ergebnisse beeinflussen. Aus diesem Grund und um die Stabilität der Ergebnisse zu überprüfen, betrachten wir zusätzlich in weiteren Schätzungen die Emissionen pro Kopf.

Determinanten der CO₂-Emissionen

Neben dem BIP wurden in der ökonomischen Literatur weitere potenzielle Einflussfaktoren auf die Emissionen identifiziert, u. a. die Außenhandelsverflechtung, die Bevölkerungsgröße, der Urbanisierungsgrad, die Altersstruktur der Gesellschaft, die F&E-Intensität, die politische Haltung der Bevölkerung, die Einkommensungleichheit sowie die Qualität öffentlicher Institutionen. Deren Wirkung auf die CO₂-Emissionen wird im Folgenden diskutiert.

Internationaler Handel

Eine wichtige Determinante, die in der Literatur mit den CO₂-Emissionen in Verbindung gebracht wird bzw. die für die Erklärung der EKC hilfreich ist, ist die Außenhandelsverflechtung. Dem Freihandel

werden gegenläufige Wirkungen zugeschrieben. Einerseits kann ein steigendes Exportvolumen das Wirtschaftswachstum erhöhen, was wiederum die Umweltverschmutzung durch eine mit dem Wirtschaftswachstum verbundene Zunahme der Produktion oder des Verkehrs sein kann. Andererseits kann der internationale Handel die Umweltqualität durch einen Technologieeffekt (d.h. wenn das Einkommen durch den Handel steigt, werden Umweltregulierungen verschärft, was Umweltschutz durch zusätzliche Innovationen fördert) und/oder den Zusammensetzungseffekt (d.h. die Umweltbelastung sinkt durch eine verringerte Produktion bestimmter emissionsintensiver Güter im Importland, während sie im Exportland durch die höhere Produktion über den internationalen Handel steigt) verbessern. Der Zusammensetzungseffekt wird auf zwei miteinander zusammenhängende Hypothesen zurückgeführt, die „Verdrängungshypothese“ und die „Pollution Haven Hypothese“, die eigentlich zwei Seiten derselben Medaille sind. Die PHH-Hypothese besagt, dass Unterschiede in der Umweltgesetzgebung zwischen Entwicklungs- und Industrieländern zu einer generellen Verlagerung der Produktion weg von den Industrieländern führen können. In diesem Zusammenhang kann auch die Thematik des „Carbon Leakage“ bzw. Anstrengungen zur Vermeidung dieses Effekts genannt werden

Der PHH-Effekt kann durch den Abschluss von Freihandelsabkommen mit Umweltklauseln reduziert werden (Brandi et al., 2020). Weitere Arbeiten zeigen, dass die Wirkung des Handels auf die Emissionen insbesondere von der Art der Exporte abhängt. Es zeigt sich ein (kausaler) emissionsmindernder Effekt des Handels mit umweltfreundlichen Gütern (Zugravu-Soilita, 2018). Einen weniger starken Zusammenhang in diese Richtung finden auch Mealy und Teytelboym (2020), die einen Komplexitätsindex auf Basis der Exporte umweltfreundlicher Produkte heranziehen. Die Autoren zeigen, dass Länder, die komplexe und umweltfreundliche Produkte international wettbewerbsfähig herstellen können, geringere CO₂-Emissionen pro Kopf aufweisen. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen reinen Handelseffekt, da Komplexität hier eine Vielzahl von Aspekten (Institutionen, F&E, Humankapital etc.) einschließt.

Bevölkerung, Bevölkerungswachstum und Urbanisierung

Die Auswirkungen des Bevölkerungswachstums auf die Umweltqualität sind im Gegensatz zum internationalen Handel eindeutig. Jeder Mensch hat einen gewissen Energiebedarf für die Befriedigung lebensnotwendiger Bedürfnisse wie Nahrung, Wasser, Kleidung, Wohnung etc. Ceteris paribus gilt: Je größer die Bevölkerung, desto größer ist der Energiebedarf.

Das genaue Ausmaß des Effekts, d.h. in welchem Verhältnis die Emissionen mit der Bevölkerungsgröße steigen, ist jedoch weniger eindeutig. ForscherInnen der „malthusianischen“ Tradition argumentieren mitunter, dass der Einsatz natürlicher und mineralischer Energieressourcen mit dem Bevölkerungswachstum überproportional zunehmen kann, insbesondere auch im Vergleich zur Aufnahmefähigkeit der Umwelt. Dieser überproportionale Einfluss der Bevölkerung auf Ressourcen, Energie

und Umwelt kann sich dann ergeben, wenn die Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger schon ausgeschöpft ist und Bevölkerungswachstum dazu führt, dass verstärkt auf fossile Energieträger zurückgegriffen wird.

Andere ForscherInnen argumentieren in der "boserupschen" Tradition. Die Entwicklung von Wissenschaft und technologischer Innovation und die daraus resultierende Fähigkeit der Menschheit, technologische Lösungen für Umweltprobleme zu finden, ist demnach umso stärker, je größer der Innovationsdruck beispielsweise durch starkes Bevölkerungswachstum ist. Dementsprechend kann der Zusammenhang zwischen Bevölkerungsgröße und Umweltbelastung eine große Bandbreite aufweisen (Shi, 2003).

Das Ausmaß der Urbanisierung steht in einer engen Beziehung zur Bevölkerungsgröße bzw. -dichte. Insbesondere in der Vergangenheit bzw. in wenig entwickelten Ökonomien konnte Urbanisierung mit höheren Emissionen/Energieverbrauch einhergehen, wenn damit eine Verlagerung vom primären Sektor Landwirtschaft hin zu Industrie und Dienstleistungen verbunden war, u.a. aus drei Gründen:

- Landwirtschaftliche Betriebe wurden mechanisiert und damit weniger arbeitsintensiv,
- die Urbanisierung trennt LebensmittelkonsumentInnen räumlich von den Lebensmittelproduzenten, wodurch ein Transportbedarf entsteht, den es in traditionellen Landwirtschafts- und Siedlungsmustern nicht gab, und
- die moderne Industrie und Produktion verbraucht mitunter mehr Energie pro Produktionseinheit und pro Arbeitskraft als die traditionelle Landwirtschaft und Produktion.

Diese Gründe könnten dazu führen, dass ein höherer Urbanisierungsgrad mit einem höheren Pro-Kopf- und Flächenverbrauch an fossilen Brennstoffen und Industriechemikalien verbunden waren/sind, wodurch die Konzentration schädlicher Schadstoffe wie CO₂, SO₂ oder NO_x steigt (Panayotou, 1997).

Auf der anderen Seite kann die Urbanisierung auch zu einem niedrigeren Energieverbrauch führen, da Städte energieeffizienter sind, etwa weil dort die Wohnsituation eine andere ist, die Wege zur Arbeit kürzer werden, sodass man sie zu Fuß oder mit dem Fahrrad zurücklegen kann, oder der öffentliche Verkehr eine größere Rolle spielt.

Auf Basis dieser theoretischen Gründe ist der Effekt von Urbanisierung auf die Umweltqualität bzw. -verschmutzung daher nicht eindeutig. Einige empirische Studien, wie z.B. Farzin und Bond (2006) mit einem Sample von entwickelten und weniger entwickelten Ländern, finden gewisse Evidenz für einen positiven Zusammenhang zwischen Urbanisierung und manchen Emissionen, was darauf hindeutet, dass der erste Kanal überwiegt.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die zahlreichen Studien, die den Zusammenhang zwischen bevölkerungsbezogenen Variablen und CO₂-Emissionen untersucht haben. Zunächst zeigt sich, dass die Bevölkerungsgröße positiv mit den CO₂-Emissionen korreliert. Die Höhe der Elastizität (dargestellt in Spalte 4) variiert jedoch stark. Die Empirie liefert also Evidenz für beide Theorien (malthusianisch und boserupsche). Im Allgemeinen sind die Elastizitäten für weniger entwickelte Länder höher. Zweitens korreliert der Urbanisierungsgrad ebenfalls positiv mit den CO₂-Emissionen, wobei die Elastizität tendenziell unter 1 liegt. In einigen Studien wurde auch ein nichtlinearer Zusammenhang gefunden, wonach ein höherer Urbanisierungsgrad in bereits stärker urban geprägten Ländern zu einem geringeren Anstieg bzw. ab einem bestimmten Urbanisierungsgrad zu einem Rückgang der Emissionen führt, was wiederum den Aspekt der Energieeffizienz widerspiegeln könnte. Drittens ist der Einfluss der Altersstruktur, der in der eigenen Schätzung betrachtet wird, nicht eindeutig - ein Großteil der Studien findet insignifikante Koeffizienten für die Altersstruktur. Darüber hinaus finden Shuai et al. (2017), dass die Bevölkerungseffekte vom Einkommensniveau abhängen.

F&E-Intensität

Die Auswirkungen des technischen Fortschritts auf die CO₂-Emissionen sind a priori ungewiss. Angesichts der positiven Auswirkungen von Forschung und Entwicklung auf Wachstum und Handel (Castellani und Pieri, 2013; Freimane und Băliņa, 2016; Minniti und Venturini, 2017) kann dies - im Einklang mit der EKC - die Umweltqualität durch höheres Wachstum und größere Handelsoffenheit negativ beeinflussen, aber auch ab einem bestimmten Entwicklungsstand zu einer Verbesserung der Umweltqualität führen. Zudem treibt F&E Innovationen, was etwa zu höherer Energie- und damit auch Klimateffizienz der Produktion beitragen kann.

Ein Teil der Literatur verwendet integrierte Bewertungsmodelle (Gu und Wang, 2018; Popp, 2006a; Popp, 2006b; Grimaud et al., 2011; Bosetti et al., 2008; Bosetti et al., 2009; Bosetti et al., 2011; Bosetti und Tavoni, 2009; Marangoni und Tavoni, 2014), um die Auswirkungen von F&E auf CO₂-Emissionen zu untersuchen. Diese Studien haben im Allgemeinen gezeigt, dass Investitionen in F&E die Umweltqualität verbessern würden. In anderen Untersuchungen wurde die Beziehung zwischen F&E und CO₂-Emissionen anhand einer Stichprobe von Unternehmen sowohl in subnationalen Regionen als auch in ganzen Ländern untersucht, wobei Paneldaten verwendet wurden, die in der Regel einen Zeitraum von 10 bis 20 Jahren abdecken. Insgesamt zeigen diese Studien, dass Investitionen in F&E die CO₂-Emissionen reduzieren.

Tabelle 6: Überblick der Studien zum Zusammenhang zwischen Bevölkerungsvariablen und Emissionen

| Studie | Daten | Variable | Elastizität |
|--------------------------------------|--|---------------|-------------------|
| Knight et al (2013) | 29 OECD Länder | Bevölkerung | 2.25 |
| | 1970–2007 | Urbanisierung | 1.09 |
| Liddle (2015) | 26 OECD & 45 nicht-OECD Länder; 1971–2006 | Bevölkerung | 1.16 |
| Jorgenson und Clark (2012) | 86 Länder | Bevölkerung | 1.55 |
| | 1960–2005 | Urbanisierung | 0.02 |
| Zhu et al. (2012) | 20 nicht-OECD Länder; 1992–2008 | Bevölkerung | 0.79 |
| | | Urbanisierung | 3.55/-0.47*) |
| Menz und Welsch (2012) | 26 OECD Länder 1960–2005 | Bevölkerung | 0.78 |
| | | Urbanisierung | 0.31 |
| | | Alter 30-44 | -1.17 |
| | | Alter 45-59 | -1.77 |
| Martinez-Zarzoso und Maruotti (2011) | 88 nicht-OECD Länder; 1975–2003 | Bevölkerung | 0.32 |
| | | Urbanisierung | 0.76/-0.12*) |
| | | Alter 15-64 | Nicht sig. |
| | | Alter 65+ | Nicht sig. |
| Poumanyong und Kaneko (2010) | 33 HI, 43 MI, & 23 LI Länder; 1975– 2005**) | Bevölkerung | 1.12/1.23/1.75**) |
| | | Urbanisierung | 0.45/0.36/0.43*) |
| Liddle und Lung (2010) | 17 OECD Länder 1960–2005 | Bevölkerung | 0.69 |
| | | Alter 20-34 | 0.20 |
| | | Alter 35-64 | -0.36 |
| Martinez-Zarzoso et al. (2007) | 23 EU Länder 1975–1999 | Bevölkerung | Nicht sig. |
| | | | |
| Shi (2003) | 88 Länder 1975–1996 | Bevölkerung | 0.83/1.97/1.58*) |
| | | Alter 15-64 | 0.63 |
| Cole und Neumayer (2004) | 86 Länder 1975–1998 | Bevölkerung | 0.98 |
| | | Urbanisierung | 0.70 |
| | | Alter <15 | Nicht sig. |
| | | Alter 15-64 | Nicht sig. |

Anmerkung: *) Linearer/quadratischer Wert; **) HI: höheres Einkommen, MI: mittleres Einkommen, LI: niedriges Einkommen; Nicht sig. = Nicht signifikant

Quelle: Liddle (2014) • Erstellt mit Datawrapper

Politische und institutionelle Faktoren

Da die Bekämpfung des Klimawandels weltweit auf der Agenda steht, liegt es auf der Hand, dass politische Gegebenheiten Einfluss auf das Niveau von CO₂-Emissionen haben. So setzen sich beispielsweise grüne Parteien in der Regel für eine Erhöhung von Steuern auf Kraftstoffe ein. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Interessen in einzelnen Parteien kann Einfluss auf wirtschaftspolitische Maßnahmen

haben. Eine stärkere Fragmentierung einer Regierung, z.B. eine Koalition aus mehreren Parteien, erschwert die Einigung auf spezifische Maßnahmen, da die Entscheidungskosten bzw. die zu berücksichtigenden Interessen mit der Anzahl der EntscheidungsträgerInnen in den Gremien steigen. Einige Studien haben sich mit der Frage beschäftigt, ob ein Zusammenhang zwischen der ideologischen Einordnung von Regierungen und der Klimapolitik besteht (z.B. King und Borchardt, 1994, Jahn, 1998, Scruggs, 1999, Neumayer, 2003, Neumayer, 2004). Über die Untersuchungen hinweg zeigt sich dabei keine schlüssige Evidenz.

Farzin und Bond (2006) gehen einen Schritt zurück und fragen, ob Demokratien erfolgreicher darin sind, effektive Umweltpolitik zu betreiben. Auf Basis empirischer Ergebnisse schließen sie, dass demokratische Systeme und die damit verbundenen individuellen Entscheidungs- und Marktfreiheiten effektiver darin sind, Umweltpräferenzen zu berücksichtigen, mit dem Ergebnis eines geringeren Ausstoßes von Schadstoffen als dies in nicht- bzw. schwächer ausgeprägten demokratischen Staaten der Fall ist.

Panayotou (1996) befasst sich ebenfalls mit der Rolle von Politik und Institutionen und ihren Auswirkungen auf die Qualität der Umwelt. Er stellt einen positiven Zusammenhang zwischen einer integrativeren und institutionell unabhängigeren Governance-Struktur bzw. Politik und der Qualität der Umwelt fest. Dasgupta et al. (2002) sehen in der Marktliberalisierung und neueren Ansätzen der Regulierung in Umweltfragen potenzielle Gründe dafür, dass die EKC abflacht und nach links rückt. Dies impliziert, dass wirtschaftliche Entwicklung von schwächer entwickelten Ländern mit geringerer Umweltverschmutzung einhergeht.

Einkommensungleichheit

Der Zusammenhang zwischen Einkommensungleichheit und Umweltqualität ist nicht eindeutig. Eine Argumentationslinie (Boyce 1994) besagt, dass Umweltzerstörung ausgeprägter ist, falls die Ungleichheit zunimmt. Dabei wird unterstellt, dass reichere Personen eine geringere Präferenz für Umweltschutz aufweisen, da sie den Folgen einfacher ausweichen können. Scruggs hingegen argumentiert, dass, ausgehend von der traditionellen ökonomischen Theorie, Personen mit höherem Einkommen eine stärkere Präferenz für Umweltschutz haben. Scruggs (1998) findet in den empirischen Schätzungen keine Evidenz für eine der beiden Argumentationen. Abhängig von der betrachteten abhängigen Umweltvariable findet er Unterstützung für beide Theorien. Er schließt, dass soziale Präferenzen über Umweltfragen auf vielen Ebenen der gesellschaftlichen Interaktionen wirken und eine Vielzahl von Akteuren und Institutionen involviert sind.

Variablendefinitionen

Tabelle 7 bietet einen Überblick über die verwendeten Haupt- sowie Kontrollvariablen. Diese beinhalten die in der Literatur identifizierten Variablen, die einen Einfluss auf die Treibhausgas-Emissionen haben:

internationaler Handel, der Abhängigkeitsquotient in der Bevölkerung, die Bevölkerungsdichte, Ausgaben für Forschung und Entwicklung, der Gini-Koeffizient bezüglich des Einkommens, sowie der Anteil der erneuerbaren Energien an der Gesamtenergieversorgung.

Tabelle 7: Variablendefinitionen und Datenquellen

| Was | Variablenbezeichnung | Genauere Bezeichnung / Anmerkung |
|---|----------------------|---|
| BIP pro Kopf | <i>gdp_pc_ppp</i> | BIP pro Kopf. laufende Preise, kaufkraftbereinigt; Quelle: OECD |
| | <i>gdp_pc_usd</i> | BIP pro Kopf (konstant 2015 US\$); Quelle: Weltbank |
| | <i>gdp_real_pc</i> | Reales BIP pro Kopf (konstante 2010 US\$); Quelle: Market Line Advantage |
| BIP | <i>gdp_cons_ppp</i> | BIP. KKP (konstante 2017 internationale \$); Quelle: Weltbank |
| | <i>gdp_cons_usd</i> | BIP (konstante 2015 US\$); Quelle: Weltbank |
| | <i>gdp_real</i> | Reales BIP gesamt (konstante 2010 US\$) Währung USD; Quelle: Market Line |
| Emissionen | <i>ghg</i> | Treibhausgasemissionen; Quelle: Market Line |
| | <i>prod_emi</i> | Jährliche produktionsbasierte CO ₂ -Emissionen; Quelle: Our World in Data |
| | <i>cons_emi</i> | Jährliche konsumbasierte CO ₂ -Emissionen; Quelle: Our World in Data |
| Variablenbezeichnung Kontrollvariablen | | |
| Handel in Prozent des BIPs | <i>trade</i> | Handel ist die Summe der Exporte und Importe von Waren und Dienstleistungen, gemessen als Anteil am BIP. Quelle: Weltbank |
| Bevölkerung | <i>adr</i> | Abhängigkeitsquotient: Zahl der abhängigen Personen (jünger als 15 oder älter als 65) je 100 Personen im erwerbsfähigen Alter. Quelle: Weltbank |
| | <i>pop_dens</i> | Bevölkerungsdichte eines Landes in Einwohnern pro km ² . Quelle: Market Line Advantage |
| F&E-Intensität | <i>rnd</i> | Ausgaben für Forschung und Entwicklung in Prozent des BIP. Quelle: Euromonitor |
| Gini-Index | <i>gini</i> | Der GINI-Index ist ein Maß für die Einkommensungleichheit (von 0 - minimale Ungleichheit bis 100 - maximale Ungleichheit). Quelle: Euromonitor |
| Renewable energy share | <i>renw_s</i> | Anteil erneuerbarer Energien an der Gesamtenergieversorgung (TES) Quelle: OECD |

Quelle: Eigene Darstellung. • Erstellt mit Datawrapper

3.2. Empirisches Untersuchungsdesign

Viele Studien, die den Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und Einflussgrößen untersuchen, verwenden Paneldaten und „fixed effects“ oder „pooled OLS“ Modelle. Andere Studien verwenden „Fully Modified OLS“ (Apergis und Payne, 2009) und „Dynamic OLS“ (Lean und Smyth, 2010) Modelle. Studien wie Atici (2009), Tamazian et al. (2009), Pao und Tsai (2010), Guangyue und Deyong (2011), Pao und Tsai (2011) oder Mehrara und Ali Rezaei (2013) untersuchen längerfristige Zusammenhänge und verwenden dafür „Panel autoregressive distributed lag“ (Panel ARDL)-Modelle. Darüber hinaus werden auch dynamische Spezifikationen mit einer verzögerten abhängigen Variablen angewendet (Li et al., 2016; Sinha und Sen,

2016; Zoundi, 2017). Einige Studien verwenden auch Länderdaten und schätzen Zeitreihen-Modelle. In dieser Studie testen wir eine Reihe an Spezifikationen um die Spannweite der Schätzergebnisse, die sich je nach verwendeter Methode unterscheiden können, darstellen zu können. Die grundlegende Gleichung, die im Folgenden geschätzt wird, sieht folgendermaßen aus:

$$\ln(\text{THG}_{it}) = \alpha_0 + \beta_1 \cdot \text{GDPpc}_{it} + \beta_2 \cdot \text{GDPpc}_{it}^2 + \mathbf{X}_{it}\boldsymbol{\gamma} + \alpha_i + [\alpha_{2i}t] + \varepsilon_{it}. \quad (1)$$

Je nach Spezifikation (wie oben diskutiert) verwenden wir als abhängige Variable entweder die gesamten THG-Emissionen oder die produktions- bzw. konsumbasierten CO₂-Emissionen. Die Koeffizienten β_1 und β_2 entsprechen den Koeffizienten der Kuznetskurve. Der Vektor X umfasst die Kontrollvariablen. Je nach Spezifikation schätzen wir das Panelmodell mit fixen Effekten (α_i) oder mit länderspezifischen Trends ($\alpha_{2i}t$). Alternativ wird auch eine „Pooled OLS“-Spezifikation geschätzt, wobei hier die BIP-Variablen kaufkraftbereinigt werden, um die Vergleichbarkeit zwischen den Ländern zu gewährleisten. Wie oben erwähnt, untersuchen wir zusätzlich Spezifikationen, in denen die abhängige Variable, die Emissionen, mit der Bevölkerungszahl normiert wird. Schließlich schätzen wir auch das nachfolgende Zeitreihen-Modell für Österreich:

$$\ln(\text{THG}_t) = \alpha_0 + \beta_1 \cdot \text{GDPpc}_t + \beta_2 \cdot \text{GDPpc}_t^2 + \mathbf{X}_t\boldsymbol{\gamma} + \varepsilon_t.$$

Die Identifikation eines kausalen Zusammenhangs zwischen den unabhängigen und der abhängigen Variable basiert auf der Annahme, dass keine simultane Kausalität zugrunde liegt. Es wird also unterstellt, dass die erklärenden Variablen auf der rechten Seite von Gleichung (1) einen kausalen Effekt auf die abhängige Variable bewirken, nicht aber umgekehrt. Ebenso wie eine Nichtberücksichtigung relevanter Bestimmungsgrößen („*omitted variable bias*“) würde auch eine simultane Kausalität („*reverse causality*“) zu einer Verzerrung der Schätzkoeffizienten führen, sodass eine verlässliche Interpretation und eine darauf basierende Ableitung von Politikempfehlungen nicht mehr verlässlich wäre. Die Strategie zur Minimierung des „*omitted variable bias*“ sieht vor, dass eine große Anzahl an Kontrollvariablen basierend auf theoretischen Überlegungen oder auch empirischen Ergebnissen herangezogen wird. Eine reverse Kausalität kann in der Regel nur schwer ausgeschlossen werden. In der Tat wird in der Literatur auf Feedback-Effekte zwischen Wertschöpfung, Energieverbrauch und Emissionen hingewiesen. Es ist jedoch möglich, die Daten auf die so genannte „Granger-Kausalität“ zu testen, das heißt inwiefern vergangene Werte einer Variablen gegenwärtige Ausprägungen beeinflussen. Dementsprechend werden nachfolgend auch Granger-Kausalitätstests durchgeführt.

3.3. Ergebnisse

Wie in Kapitel 2.1 dargelegt, beschreibt die Theorie der Umwelt-Kuznets-Kurve, dass Wirtschaftswachstum ab einem wirtschaftlichen Entwicklungsniveau zu einem Rückgang der Emissionen führt. Niedrigere Emissionsniveaus können der Theorie zufolge also entweder durch eine starke Reduktion des BIP oder durch ein höheres BIP und damit höheres Wirtschaftswachstum erreicht werden. Unter der Annahme, dass dieser langfristige Zusammenhang auch für Österreich gilt, wird im Folgenden jenes wirtschaftliche Niveau ermittelt, bei welchem die Ziele der verschiedenen Emissionsszenarien im Jahr 2040 in Österreich erreicht werden. Dazu wird zuerst der Zusammenhang zwischen Emissionen und Wirtschaftsleistung über Regressionsschätzungen gemäß Kapitel 3.2 durchgeführt. Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 zeigen die Ergebnisse der Schätzungen. Die Zeitreihenschätzungen ziehen Daten für den Zeitraum 2000 bis 2020 heran.

Die Ergebnisse der Panel Granger-Kausalität Tests (nach der Methodik von Juodis et al. 2021 und Xiao et al. 2023) deuten darauf hin, dass für die Spezifikation mit Gesamtemissionen als abhängige Variable das Problem der umgekehrten (Granger-)Kausalität ausgeschlossen werden kann. Die Wald-Test-Statistik für eine Spezifikation in der das Bruttoinlandsprodukt durch die Gesamtemissionen der Vorperiode erklärt wird, beträgt 2,87, der p-Wert liegt bei 0,09. Für produktionsbasierte (Test Statistik bei 55,83) und konsumbasierte (Test Statistik bei 12,92) Emissionen gilt dies nicht, sodass eine kausale Interpretation problematisch ist. Angesichts dieser Ergebnisse interpretieren wir die Ergebnisse bezüglich der Gesamtemissionen vorsichtig als möglicherweise kausal unter dem Vorbehalt der begrenzten Aussagekraft der Granger-Kausalität.

Die Ergebnisse der Panelschätzungen mit fixen Effekten sowie der Zeitreihenschätzungen für Österreich sind in Tabelle 8 dargestellt. In den Spalten (1) und (2) ist die abhängige Variable durch die Gesamt-Treibhausemissionen gegeben, in den Spalten (3) und (4) wird auf produktionsbasierte CO₂ Emissionen und in den Spalten (5) und (6) auf konsumbasierte Emissionen abgestellt. In den Spezifikationen (1), (2), (3) und (5) bestätigen die geschätzten Koeffizienten das Vorliegen einer Umwelt-Kuznets-Kurve. Alle Modelle weisen eine hohe Erklärungskraft. Ebenso sind die F-Statistiken hochsignifikant. Die Koeffizienten der Kontrollvariablen sind in der Regel statistisch signifikant und weisen ein Vorzeichen auf, welches den theoretischen Vorhersagen entspricht. Beispielsweise reduziert die Außenverflechtung einer Volkswirtschaft, gemessen als Summe der Im- und Exporte als Anteil am BIP, die Gesamtemissionen sowie die produktionsbasierten Emissionen. Dies ist konsistent mit der „Pollution-Haven-Hypothese“. Bei den konsumbasierten Emissionen ist das Vorzeichen positiv, was im Einklang mit der These der Verlagerung von „schmutziger“ Produktion in schwächer entwickelte Länder ist. In Bezug auf die Bevölkerungsdichte sind

die Koeffizienten in den Spalten (3) und (5) signifikant. Eine Erklärung wäre, dass eine höhere Bevölkerungsdichte im Zeitverlauf einen Bevölkerungszuwachs impliziert, der nicht vollständig über die fixen Effekte eingefangen wurde. Der Abhängigkeitsquotient in der Bevölkerung korreliert in der Panelschätzung negativ mit allen drei abhängigen Variablen. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass die Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter mobiler ist und damit ein höherer Emissionsverbrauch einhergeht. Aus theoretischer Sicht ist ex ante nicht eindeutig, ob von dieser Variable ein positiver oder negativer Einfluss ausgeht sollte (siehe etwa Ono und Maeda 2001 und Farzin und Bond 2006).

Tabelle 8: Ergebnis der Zeitreihen- und Panelregressionsschätzungen mit Time-Fixed-Effects

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| | log_ghg | log_ghg | log_prod_emi | log_prod_emi | log_cons_emi | log_cons_emi |
| gdp_real_pc | 3.217*** (6.826) | 86.459** (3.936) | 2.974*** (12.613) | -3.143 (-0.196) | 2.103*** (6.307) | 17.617 (1.625) |
| gdp_real_pc^2 | -2.021*** (-4.911) | -87.752** (-3.881) | -1.533*** (-7.447) | 3.904 (0.236) | -0.905** (-3.144) | -20.320+ (-1.821) |
| trade | 0.000 (0.022) | -0.007* (-2.431) | -0.001*** (-3.563) | 0.001 (0.601) | 0.001+ (1.883) | 0.007*** (4.704) |
| adr | -0.014*** (-6.394) | 0.127 (1.670) | -0.017*** (-15.255) | -0.106+ (-1.895) | -0.022*** (-13.934) | -0.045 (-1.205) |
| pop_dens | 0.000 (0.196) | -0.044 (-1.648) | -0.001** (-3.265) | 0.028 (1.461) | 0.003*** (5.975) | 0.019 (1.475) |
| rnd | 0.034 (1.447) | 0.232* (2.547) | 0.012 (0.990) | 0.034 (0.504) | -0.033+ (-1.945) | -0.136* (-3.020) |
| gini | -0.030*** (-6.985) | -0.001 (-0.071) | -0.006* (-2.574) | 0.011 (0.714) | -0.001 (-0.371) | 0.018 (1.714) |
| renw_s | -0.015*** (-7.306) | -0.041*** (-5.963) | -0.018*** (-17.824) | -0.018** (-3.524) | -0.013*** (-8.474) | -0.006+ (-1.846) |
| Konstante | 12.850*** (60.390) | -10.441+ (-1.851) | 19.266*** (180.981) | 20.783*** (5.034) | 19.168*** (127.200) | 14.066*** (5.052) |
| # Beobachtungen | 714 | 21 | 714 | 21 | 693 | 21 |
| # Länder | 34 | 1 | 34 | 1 | 33 | 1 |
| FE | Ja | Nein | Ja | Nein | Ja | Nein |
| Zeitreihe | Nein | Ja | Nein | Ja | Nein | Ja |
| R ² | 0.3429 | 0.8744 | 0.6592 | 0.9139 | 0.4834 | 0.9322 |
| F-Stat | 43.84 | 18.40 | 162.49 | 27.55 | 76.25 | 35.35 |

Anmerkung: + $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$; R² (within) in Spalten (1) (3) und (5); Adj-R² in Spalten (2) (4) und (6).

Erstellt mit Datawrapper

Die Schätzkoeffizienten für die F&E-Quote sind oftmals nicht signifikant. In zwei Spezifikationen zeigt sich eine (schwache) Korrelation: F&E korreliert positiv mit den Gesamtemissionen im Zeitreihenmodell sowie negativ mit den konsumbasierten Emissionen sowohl in der Panelschätzung als auch im Zeitreihenmodell. Ähnlich wie im Papier von Scruggs (1998) korreliert die Einkommensungleichheit, repräsentiert durch den Gini-Koeffizienten, nur schwach und mit wechselndem Vorzeichen mit den THG-Emissionen. Dies bestätigt das Ergebnis, dass die Einkommensungleichheit keinen wesentlichen kausalen Einfluss auf die Emissionen zu haben scheint. Schließlich und erwartungsgemäß korreliert der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Gesamtenergieverbrauch negativ und hochsignifikant mit den THG-Emissionen.

In Tabelle 9 werden die Ergebnisse für Panelschätzungen mit einer länderspezifischen Trendvariable, die den fixen Effekt ersetzt, dargestellt. Länderspezifische Zeittrends in einer Panelregression haben den Vorteil, dass sie Veränderungen auf nationaler Ebene im Zeitverlauf erfassen können, während über fixe Effekte nur Unterschiede zwischen den Ländern berücksichtigt werden. Dies erlaubt es, länderspezifische Entwicklungen zu identifizieren, die unabhängig voneinander in einzelnen Ländern auftreten. Auch bei diesen Schätzungen zeigt sich in allen drei Fällen eine Kuznets-Kurve. Einige Ergebnisse weichen in diesen Spezifikationen von den Panelschätzungen in Tabelle 8 deutlich ab. Erstens lässt sich feststellen, dass aufgrund der länderspezifischen Trends der Erklärungsgehalt (R^2) sehr hoch ist. Das bedeutet aber auch, dass ein großer Teil der „Within“-Variation der Paneldaten durch die Trendvariablen erklärt wird. Dies resultiert in einer geringeren Signifikanz von über die Zeit stabileren Variablen. Bei einigen Einflussgrößen ändert sich deren qualitativer Zusammenhang (Wechsel des Vorzeichens). So dreht etwa der Koeffizient beim Handel in der Schätzung der produktionsbasierten Emissionen das Vorzeichen, was im Widerspruch zur *Pollution-Haven-Hypothese* steht. Auch bei der Bevölkerungsdichte ist der Koeffizient in der Spezifikation (3), in welcher die abhängige Variable die konsumbasierten Emissionen sind, negativ. Die Vorzeichen drehen sich auch für den Einfluss der F&E-Quote. Der Anteil der erneuerbaren Energieträger an der Gesamtenergieversorgung behält sein negatives Vorzeichen bei. Angesichts des Wechsels des qualitativen Einflusses einer Reihe von Variablen in den Schätzungen mit länderspezifischen Trends, der zum Teil theoretischen Überlegungen entgegensteht, ist die Panelschätzung mit fixen Effekten unsere bevorzugte Spezifikation. Hervorzuheben ist aber, dass sich auch in den Schätzungen in Tabelle 9 eine Umwelt-Kuznets-Kurve ergibt.

Tabelle 9: Ergebnis der Panelregressionsschätzungen mit länderspezifischen Trends

| | (1) | (2) | (3) |
|-----------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| | log_ghg | log_prod_emi | log_cons_emi |
| gdp_real_pc | 2.885*** (4.580) | 3.054*** (8.882) | 3.640*** (7.400) |
| gdp_real_pc^2 | -1.528** (-3.069) | -1.639*** (-6.029) | -2.039*** (-5.328) |
| trade | 0.000 (0.301) | 0.001** (2.657) | -0.001* (-2.360) |
| adr | 0.000 (0.123) | -0.008*** (-5.068) | -0.014*** (-6.256) |
| pop_dens | -0.005+ (-1.818) | -0.004** (-2.784) | -0.010*** (-4.465) |
| rnd | -0.050* (-2.138) | 0.028* (2.170) | 0.031+ (1.665) |
| gini | -0.009* (-2.371) | 0.001 (0.620) | 0.001 (0.424) |
| renw_s | -0.007** (-3.026) | -0.014*** (-10.515) | -0.010*** (-5.109) |
| year | 0.078*** (19.137) | 0.019*** (8.664) | 0.020*** (6.397) |
| Konstante | -146.901*** (-17.734) | -20.499*** (-4.533) | -21.332*** (-3.376) |
| # Beobachtungen | 714 | 714 | 693 |
| # Länder | 34 | 34 | 33 |
| Länder Trends | Ja | Ja | Ja |
| R ² | 0.9966 | 0.9989 | 0.9972 |
| F-Stat | 2523.60 | 8451.55 | 3437.45 |

Anmerkung: + $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$; Adj-R². Nicht ausgewiesen: Ländertrends

Erstellt mit Datawrapper

Tabelle 10: Ergebnis der gepoolten Schätzung

| | (1) | (2) | (3) |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | log_ghg | log_prod_emi | log_cons_emi |
| gdp_pc_ppp | 5.583*** (7.989) | 4.046*** (6.615) | 3.843*** (6.289) |
| gdp_pc_ppp^2 | -1.326+ (-1.938) | -0.135 (-0.226) | 0.455 (0.765) |
| trade | -0.023*** (-27.632) | -0.023*** (-30.930) | -0.022*** (-30.055) |
| adr | -0.031*** (-4.927) | -0.035*** (-6.433) | -0.030*** (-5.519) |
| pop_dens | 0.001*** (4.535) | 0.001** (3.060) | 0.000+ (1.849) |
| rnd | -0.266*** (-6.262) | -0.159*** (-4.280) | -0.076* (-2.054) |
| gini | -0.003 (-0.535) | 0.012* (2.252) | 0.012* (2.186) |
| renw_s | -0.056*** (-23.406) | -0.061*** (-29.058) | -0.069*** (-22.789) |
| Konstante | 14.936*** (39.109) | 21.684*** (64.886) | 21.515*** (64.818) |
| Beobachtungen | 714 | 714 | 693 |
| # Länder | 34 | 34 | 33 |
| FE | Nein | Nein | Nein |
| R^2 | 0.7902 | 0.7272 | 0.7401 |
| F-Stat | 336.73 | 238.59 | 247.27 |

Anmerkung: + $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$; Adj-R². Pooled OLS.

Erstellt mit Datawrapper

Schließlich sind in Tabelle 10 die Ergebnisse einer gepoolten Schätzung (*pooled OLS*) dargestellt. Bei diesen Schätzungen kann die Kuznets-Kurve nur für die Gesamtemissionen bestätigt werden. Bei der Verwendung von Pooled-OLS werden allerdings die individuellen Unterschiede zwischen den Einheiten und die zeitlichen Veränderungen nicht explizit berücksichtigt, womit dahinterliegende Heterogenität zwischen den Einheiten und über die Zeit möglicherweise zu Verzerrungen führt. Diese Spezifikation kann also als weniger belastbar angesehen werden.

Im Anhang in Tabelle 12 und Tabelle 13 finden sich noch die Ergebnisse für Schätzungen basierend auf den Emissionen pro Kopf als abhängige Variable. Den Ergebnissen in Tabelle 12 nach, zeigen sich

Kuznets-Kurven sowohl für die Gesamtemissionen als auch für die produktionsbasierten Emissionen, während für konsumbasierte Emissionen eine „U-förmige“ Beziehung festgestellt werden kann. Darüber hinaus sind sowohl der qualitative Einfluss als auch die Signifikanz der anderen Kontrollvariablen ähnlich zu den Schätzungen der Hauptspezifikation.

Anhand der in den Regressionen ermittelten Koeffizienten der EKC kann nun jenes Wertschöpfungsniveau ermittelt werden, ab welchem zusätzliches Wachstum zu einer Reduktion der Emissionen führt (der sogenannte „Turning Point“ (TP) oder Wendepunkt). Die TPs zu den Panel-Regressionen finden sich in Tabelle 11. Trifft man Annahmen über das Niveau der Kontrollvariablen, dann kann zu jedem beliebigen Emissions-Niveau basierend auf dem Kuznets-Kurven-Zusammenhang ein entsprechendes BIP-Niveau ermittelt werden. In einem ersten Schritt wird unterstellt, dass sich die Kontrollvariablen entsprechend einer linearen Fortschreibung der Vergangenheit entwickeln. Für die Konstante wurde der Fixed-Effekt von Österreich bzw. des Jahres 2020 verwendet. Die resultierende jährliche Wachstumsrate des BIP für die einzelnen Panel-Schätzungen in vier verschiedenen Emissionsszenarien sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Emissions-Szenarien betreffen in jedem der Fälle das Jahr 2040. Das Szenario Klimaneutralität 2040 wurde wie in Kirchengast et al. (2022) auf 5% des Emissionsniveaus von 1990 gesetzt.⁵ Die Ergebnisse stellen das notwendige durchschnittliche BIP-Wachstum pro Jahr im Zeitraum von 2020 bis 2040 dar, um das gewünschte Emissionsniveau zu erreichen.

In einem zweiten Schritt werden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um die Robustheit der Ergebnisse zu testen. Es wird unterstellt, dass die Kontrollvariablen normalverteilt⁶ sind. Die Verteilung des Schätzungsergebnisses für die Panelregression (1) aus Tabelle 8 für das Szenario Null-Emissionen nach 15.000 Simulationen ist in Abbildung 5 dargestellt. Wie sich zeigt, weichen die Ergebnisse nicht weit voneinander ab und bewegen sich einem sehr kleinen Spektrum. Somit weisen die Schätzungen unter der Annahme des Zeittrends der Kontrollvariablen eine gewisse Robustheit auf.

⁵ 5% der Emissionen von 1990 können als klimaneutral angesehen werden, wenn den verbleibenden Emissionen eine Reduktion über CO₂-Abscheidung und -speicherung (CCS) und natürliche Senken gegenübersteht.

⁶ Die Normalverteilung der einzelnen Kontrollvariablen wurde auf Basis der Daten über die 34 Länder des Datensatzes parametrisiert.

Abbildung 5 Resultierendes BIP-Wachstum mit Monte-Carlo-Simulationen bezüglich der Kontrollvariablen

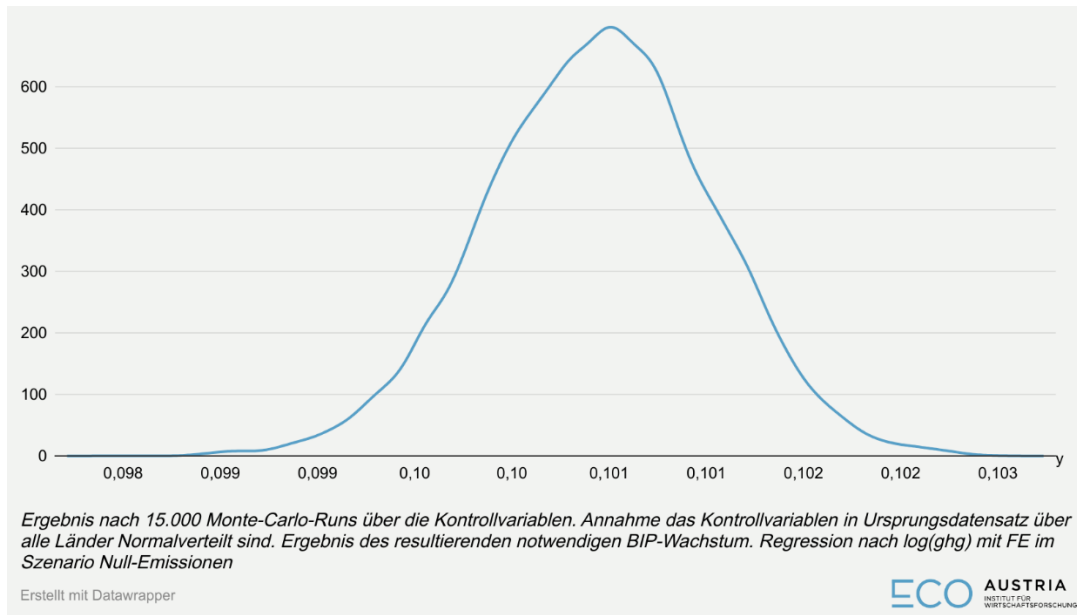


Tabelle 11: Notwendiges korrespondierendes durchschnittliches reales BIP-Wachstum bis 2040

| Abhängige Variable: | log_ghg | log_prod_emi | log_prod_cons | log_ghg | log_prod_emi | log_prod_cons |
|--------------------------------|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|
| Turning Point | 79,582.7 | 96,976.7 | 116,123.4 | 75,114.7 | 155,128.4 | 949,588.4 |
| -41% der Emissionen von 2005 | 0.043 | 0.098 | 0.114 | x | 0.118 | 0.209 |
| -61% der Emissionen von 2005 | 0.054 | 0.099 | 0.115 | x | 0.119 | 0.209 |
| Klimaneutralität (5% von 1990) | 0.074 | 0.105 | 0.120 | 0.057 | 0.124 | 0.212 |
| Null-Emissionen | 0.099 | 0.118 | 0.133 | 0.086 | 0.137 | 0.218 |
| Ländertrends | Nein | Nein | Nein | Ja | Ja | Ja |
| FE (Zeit) | Ja | Ja | Ja | Nein | Nein | Nein |

Anmerkung: Notwendiges durchschnittliches jährliches Wachstum bis zum Jahr 2040 bei Anwendung der Panel-Regressions-Schätzungen. Für die Konstante wurden jeweils die Fixed Effects für Österreich bzw. 2020 angenommen. Für die Kontrollvariablen wurde der Zeittrend der Vergangenheit fortgeschrieben.

Erstellt mit Datawrapper

Die Ergebnisse zeigen, dass unter den getroffenen Annahmen ein jährliches Wirtschaftswachstum zwischen 4,3% (-41% der GHG-Emissionen) und 13,7% (Null-CO₂-Emissionen) bis 2040 notwendig wäre.⁷ Somit zeigt sich, dass das BIP-Wachstum unter der Annahme einer EKC-Kurve zu einer Reduktion der Emissionen in Österreich beitragen kann. Allerdings werden die Emissionsreduktionsziele nicht durch Wirtschaftswachstum allein zu erreichen sein, auch da derart hohe jährliche Wachstumsraten realistischerweise nicht zu erwarten sind. Dies ist auch eine Folgerung aus der EKC-Literatur. Somit braucht es neben dem Wirtschaftswachstum auch bedeutsame politische Maßnahmen, welche auf Emissionsreduktionen abzielen. Es hängt somit neben dem reinen Wirtschaftswachstum, welches unausweichlich für die Transformation notwendig ist, wohl auch von der Art des Wachstums ab.

⁷ Die hohen Wachstumsraten für die Regression in der letzten Spalte (abhängige Variable: konsumbasierten Emissionen, es wird für Ländertrends kontrolliert) resultieren daraus, dass die Fixed Effects bei dieser Regression sehr hoch sind. Das heißt, es sind jene Effekte, die über alle Länder der OECD ident sind und nur vom jeweiligen Jahr und nicht vom Niveau der anderen erklärenden Variablen beeinflusst werden, sehr hoch. Die grafische Interpretation wäre, dass die Kuznetskurve in dem Fall entlang der Y-Achse weit nach oben verschoben ist.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

In der Öffentlichkeit wird häufig die Forderung nach einem sogenannten „Degrowth“, das heißt einer Reduktion der wirtschaftlichen Aktivität erhoben, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Dabei wird neben den negativen sozialen und ökonomischen Konsequenzen einer derartigen Strategie übersehen, dass es in entwickelten Ländern, wie Österreich, ab einem gewissen Niveau der Wirtschaftsentwicklung empirische Evidenz für einen negativen Zusammenhang zwischen Wirtschaftsleistung und THG-Emissionen gibt. Das bedeutet, dass Emissionen nicht nur von der Wirtschaftsleistung entkoppelt werden können, sondern die wirtschaftliche Entwicklung geradezu eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Dekarbonisierung darstellt. Anhand einer ökonometrischen Schätzung wurde in dieser Studie festgestellt, dass die für eine vollständige Dekarbonisierung notwendigen Wachstumsraten aber sehr hoch ausfallen. Um das Ziel einer Senkung der Emissionen um 41 Prozent bis 2040 zu erreichen, ist eine jährliche reale Wachstumsrate des BIP von 4,3 Prozent notwendig. Um im Jahr 2040 Klimaneutralität zu erreichen, würde es demnach ein jährliches reales Wachstum von 7,4 Prozent benötigen.

An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass künftige Strukturveränderungen bei dieser Abschätzung möglicherweise unterschätzt werden, wenn striktere politische Maßnahmen getroffen werden, um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen. Die Analyse zeigt, dass weitere Maßnahmen notwendig sind. Wirtschaftswachstum alleine wird nicht ausreichen. Insbesondere steht die Wirtschaft derzeit vor einer Palette an Problemen, die kurz- und mittelfristig kein kräftiges Anziehen der Wirtschaftsentwicklung erwarten lässt. Die Empfehlungen, die sich aus den Ergebnissen ergeben, betreffen primär zwei Aspekte: Der erste betrifft die Frage, wie die wirtschaftliche Entwicklung befördert werden kann, wofür grüne Innovationen eine Grundlage bilden werden, und der zweite weitere wirtschaftspolitische Maßnahmen zur Unterstützung der Transformation.

Die folgenden Empfehlungen ergeben sich aus der EKC-Hypothese:

- Eine energie- und kosteneffiziente Wirtschaft erfordert vor dem Hintergrund der Bepreisung von CO₂-Emissionen die Einbeziehung sauberer Energietechnologien in den Energiemix, einschließlich erneuerbarer Energien und saubere Energietechnologien für fossile Brennstoffe, die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung nutzen.
- Eine **verstärkte globale Kooperation**, wie Handel und ausländische Direktinvestitionen von Industrie- in Entwicklungsländer, verbunden mit dem Transfer von umweltfreundlichen Technologien, würde zur Verwirklichung einer nachhaltigen Entwicklung beitragen.
- Die **Integration von Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels** (Bewusstseinsbildung, Aufbau von Kapazitäten, Anpassungsoptionen und Frühwarnsignale) auf den verschiedenen

politischen Ebenen (inter- und supranational als auch regional) ist eine wesentliche Voraussetzung für die Zielerreichung.

- Die Förderung einer **nachhaltigen Industrialisierung**, die industrielle Wertschöpfung, Innovation, technologischen Fortschritt und wissenschaftliche Forschung und Entwicklung zusammenführt, ist von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der Klimaneutralität.
- Eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende setzt auch voraus, dass entsprechend **ausgebildete Fachkräfte** zur Verfügung stehen. Dazu wird es notwendig sein, Regularien und Ausbildungen entsprechend anzupassen bzw. zu modernisieren, dass entsprechende Arbeitskräfte rasch eingesetzt werden können. In diesem Zusammenhang muss auch das Augenmerk auf die Zuwanderung von Fachkräften gelegt werden.
- **CO₂ als Ressource nutzen:** Die Abscheidung, Lagerung, Speicherung und Verwendung von CO₂ sind – auch unter dem Ressourcenaspekt – unverzichtbare Instrumente für das Erreichen der Klimaziele.
- Die Bedeutung einer prosperierenden Wirtschaft als Grundlage für die Klimawende sollte in **der Ausbildung und in der öffentlichen Kommunikation verstärkt betont werden**. Das Bewusstsein dafür zu schaffen, dass wirtschaftliche Entwicklung und Klimaschutz Hand in Hand gehen müssen, ist entscheidend, um nachhaltige Lösungen zu fördern.

Ferner müssen weitere Maßnahmen gesetzt werden, um Innovationen insbesondere im Bereich der Entwicklung von grünen Technologien etwa für die Produktion voranzutreiben. Dadurch ist es nicht nur möglich höhere Wachstumsraten durch Innovationen zu erzielen, sondern auch den Prozess der Entkopplung zu beschleunigen. Wie Schwarzbauer, Bittó und Koch (2023) betonen muss Klima-, Industrie- und Technologiepolitik gemeinsam gedacht werden. Sie raten auch zu folgenden Schritten:

- Ein zentraler wirtschaftspolitischer Hebel im Kontext der Industriepolitik ist die **rasche Ausweitung des europäischen Emissionshandels (ETS)** auf möglichst viele Bereiche der Volkswirtschaft, da der im ETS vorgesehene Mechanismus Anreize für einen schnelleren Umstieg schafft. Geplant ist die Einführung eines EU-weiten ETS II für Gebäude und Verkehr mit dem Jahr 2027. Prinzipiell wäre die gemeinsame Bepreisung von Emissionen in einem umfassenden System ökonomisch effizient, jedoch besteht die Gefahr, dass die Politik auf nationaler Ebene private Haushalte für die höheren Kosten (teilweise) entschädigt und dadurch die ETS-Preisbildung verzerrt, sodass dies zu höheren Kosten für die Unternehmen und geringerer Wettbewerbsfähigkeit führt. Im Rahmen des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) erfolgt ab dem Jahr 2026 eine Bepreisung der Emissionen von importierten Gütern (derzeit nur für eine sehr beschränkte Klasse von Gütern, wie Zement und Eisen und Stahl). Die

Regelung soll die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen stärken. Die derzeitige Regelung der Bepreisung von CO₂-Emissionen von Importen in die EU ist aber nicht standortneutral, da sie die Kosten für EU-Exporteure erhöht, wenn sie importierte Produkte wieder in Drittstaaten exportieren. Um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft zu erhalten und Standortneutralität zu gewährleisten, ist es aus Sicht von EcoAustria sinnvoll, Vorleistungsabgaben für EU-Exporte, die aus Drittstaaten importiert werden, beim Export zu refundieren (Schwarzbauer, Bittó und Koch, 2023). Dies würde der Regelung bei der Einfuhrumsatzsteuer entsprechen.

- **Innovation stärken:** Die Säule der Technologie- und Innovationspolitik ist dahingehend relevant, da die zukünftigen Güter- und Dienstleistungsspezialisierungen einer Ökonomie unter anderem von der heutigen Forschung und Entwicklung abhängen. Österreich liegt mit einem Anteil von 12 Prozent an grünen Exportspezialisierungen über dem EU-Durchschnitt. Dieser Anteil stagnierte jedoch in den letzten Jahren. Um die Position Österreichs weiter zu stärken, gibt es zwei zentrale Hebel. Das sind die Ausschöpfung von Innovationspotenzialen durch Kooperationen und die Schaffung von besseren Rahmenbedingungen für Risikokapital und Spin-Offs von Universitäten.
- **Reduktion der konsumbedingten Emissionen vorantreiben:** Der Konsum in europäischen Staaten wie Deutschland, Österreich und der Schweiz führt häufig zu mehr CO₂-Emissionen als die Länder selbst ausstoßen. In Österreich verursacht der Konsum durch Haushalte vor allem Emissionen in der Energieerzeugung, Warenherstellung und im Transport. Eine schnelle Ausweitung des ETS auf alle Wirtschaftsbereiche könnte dazu führen, dass klimaschädlicher Konsum der Haushalte teurer wird und emissionsarme Güter relativ billiger. Allerdings ist es wichtig, den Preismechanismus nicht durch großzügige Ausnahmeregelungen zu beeinträchtigen.

Jedoch steht Österreich gerade vor der Herausforderung stark gestiegener Energiepreise und entsprechender Nachteile für die Wettbewerbsfähigkeit. Maßnahmen, die zu rascher Dekarbonisierung führen, befördern zusätzlich das Ziel, die Abhängigkeit von teuren fossilen Energiequellen zu reduzieren. Köppl-Turyna, Berger und Strohnner (2023) schlagen insbesondere folgende Maßnahmen vor:

- Für die Verwendung von **Wasserstoff als Energieträger** bedarf es unter anderem eines Ausbaus der Netze, funktionierender regulatorischer Rahmenbedingungen, einer Diversifizierung der Wasserstoffquellen sowie einer Unterstützung von Investitionen in der Frühphase.

- Für die notwendige **Elektrifizierung der Gesellschaft** sind insbesondere der Ausbau erneuerbarer Energiequellen sowie der Netzinfrastruktur, eine flexiblere Anpassung von Energie-Angebot und -Nachfrage sowie eine Sicherstellung der Versorgung mit kritischen Rohstoffen von Bedeutung.

Schließlich sollen auch disruptive grüne Innovationen, die von neuen Unternehmen ausgehen, durch Verbesserungen bei den Rahmenbedingungen für klimafreundliche Start-Up Unternehmen forciert werden. Zu den notwendigen Schritten gehören (basierend auf Köppl-Turyna, Köppl und Bittó, 2022 und Köppl-Turyna, Köppl und Christopoulos 2023):

- Österreich braucht **mehr Risikokapital**. Im Jahr 2021 betrug Risikokapitalinvestitionen in Österreich nur 0,3 % des BIP – das ist deutlich niedriger als in Vergleichsländern.
- **Sicherung der Nachfrage** nach Grünen Technologien, um höhere Renditen und niedrigere Risiken für Kapitalgeber zu gewährleisten.
- Verbesserung der Rahmenbedingungen durch eine Reform der **Mitarbeiterbeteiligung** oder der **Besteuerung von Carried Interest**.
- Entwicklung von **Spin-Off Strategien**, die sich an Best Practices innerhalb Europas orientieren.
- **Indirekte (hybride) öffentliche Risikokapitalfinanzierung** durch Dachfondsmodelle.
- **Öffentliche Kofinanzierung der Risikokapitalinvestitionen** unter Beibehaltung der privaten Risikoprofile und marktüblichen Konditionen, um so Verzerrungen am Markt zu verhindern.
- **Ausbau der kapitalgedeckten Altersvorsorge**, um somit auch Pensionskassen zu veranlassen künftig höhere Summen in Risikokapital zu investieren.

LITERATURVERZEICHNIS

- Ahmad, N., Du, L., Lu, J., Wang, J., Li, H. Z. & Hashmi, M. Z. (2017). Modelling the CO₂ emissions and economic growth in Croatia: is there any environmental Kuznets curve?, *Energy* 123, 164-172.
- Ang, J. B. (2007). CO₂ emissions, energy consumption, and output in France, *Energy policy* 35(10), 4772-4778.
- Ansari, M. A., Haider, S. & Khan, N. A. (2020). Does trade openness affects global carbon dioxide emissions: evidence from the top CO₂ emitters, *Management of Environmental Quality: An International Journal* 31(1), 32-53.
- Apergis, N. (2016). Environmental Kuznets curves: new evidence on both panel and country-level CO₂ emissions, *Energy Economics* 54, 263-271.
- Apergis, N. & Payne, J. E. (2009). CO₂ emissions, energy usage, and output in Central America, *Energy Policy* 37(8), 3282-3286.
- Atici, C. (2009). Carbon emissions in Central and Eastern Europe: environmental Kuznets curve and implications for sustainable development, *Sustainable Development* 17(3), 155-160.
- Balaguer, J. & Cantavella, M. (2016). Estimating the environmental Kuznets curve for Spain by considering fuel oil prices (1874–2011), *Ecological Indicators* 60, 853-859.
- Bella, G., Massidda, C. & Mattana, P. (2014). The relationship among CO₂ emissions, electricity power consumption and GDP in OECD countries, *Journal of Policy Modeling* 36(6), 970-985.
- Bilgili, F., Koçak, E. & Bulut, Ü. (2016). The dynamic impact of renewable energy consumption on CO₂ emissions: a revisited Environmental Kuznets Curve approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 838-845.
- Bölük, G. & Mert, M. (2014). Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries, *Energy* 74, 439-446.
- Bosetti, V. & Tavoni, M. (2009). Uncertain R&D, backstop technology and GHGs stabilization, *Energy Economics* 31, S18-S26.
- Bosetti, V., Carraro, C., Duval, R. & Tavoni, M. (2011). What should we expect from innovation? A model-based assessment of the environmental and mitigation cost implications of climate-related R&D, *Energy Economics* 33(6), 1313-1320.

- Bosetti, V., Carraro, C., Massetti, E., Sgobbi, A. & Tavoni, M. (2009). Optimal energy investment and R&D strategies to stabilize atmospheric greenhouse gas concentrations, *Resource and Energy Economics* 31(2), 123-137.
- Bosetti, V., Carraro, C., Massetti, E. & Tavoni, M. (2008). International energy R&D spillovers and the economics of greenhouse gas atmospheric stabilization, *Energy Economics* 30(6), 2912-2929.
- Boyce, R. (1994). Inequality as a cause of environmental degradation, *Ecological Economics* 11(3), 169-178.
- Brandi, C., Schwab, J., Berger, A. & Morin, J. F. (2020). Do environmental provisions in trade agreements make exports from developing countries greener?, *World Development* 129, 104899.
- Castellani, D. & Pieri, F. (2013). R&D offshoring and the productivity growth of European regions, *Research Policy* 42(9), 1581-1594.
- Churchill, S. A., Inekwe, J., Ivanovski, K. & Smyth, R. (2018). The environmental Kuznets curve in the OECD: 1870–2014, *Energy Economics* 75, 389-399.
- Dasgupta, S., Laplante, B., Wang, H. & Wheeler, D. (2002). Confronting the environmental Kuznets curve, *Journal of Economic Perspectives* 16(1), 147-168.
- Dinda, S. (2004). Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey, *Ecological Economics* 49(4), 431-455.
- Dinda, S. & Coondoo, D. (2006). Income and emission: a panel data-based cointegration analysis, *Ecological Economics* 57(2), 167-181.
- Dong, B., Wang, F. & Guo, Y. (2016). The global EKC, *International Review of Economics & Finance* 43, 210-221.
- Esteve, V. & Tamarit, C. (2012). Is there an environmental Kuznets curve for Spain? Fresh evidence from old data, *Economic Modelling* 29(6), 2696-2703.
- Farzin, Y. H. & Bond, C. A. (2006). Democracy and environmental quality, *Journal of Development Economics* 81(1), 213-235.
- Fosten, J., Morley, B. & Taylor, T. (2012). Dynamic misspecification in the environmental Kuznets curve: evidence from CO₂ and SO₂ emissions in the United Kingdom, *Ecological Economics* 76, 25-33.
- Freimane, R. & Bāliņa, S. (2016). Research and development expenditures and economic growth in the EU: A panel data analysis, *Economics and Business* 29(1), 5-11.

- Friedl, B. & Getzner, M. (2003). Determinants of CO₂ emissions in a small open economy, *Ecological Economics* 45(1), 133-148.
- Frodyma, K., Papież, M. & Śmiech, S. (2022). Revisiting the environmental Kuznets curve in the European Union countries, *Energy* 241, 122899.
- Grimaud, A., Lafforgue, G. & Magné, B. (2011). Climate change mitigation options and directed technical change: A decentralized equilibrium analysis, *Resource and Energy Economics* 33(4), 938-962.
- Grossman, G. M. & Krueger, A. B. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement, NBER Working Paper No. 3914.
- Gu, W., Zhao, X., Yan, X., Wang, C. & Li, Q. (2019). Energy technological progress, energy consumption, and CO₂ emissions: empirical evidence from China, *Journal of Cleaner Production* 236, 117666.
- Guangyue, X. & Deyong, S. (2011). An empirical study on the environmental Kuznets curve for China's carbon emissions: based on provincial panel data, *Chinese Journal of Population Resources and Environment* 9(3), 66-76.
- Hettige, H., Mani, M. & Wheeler, D. (2000). Industrial pollution in economic development: The environmental Kuznets curve revisited, *Journal of Development Economics* 62(2), 445-476.
- Iwata, H., Okada, K. & Samreth, S. (2010). Empirical study on the environmental Kuznets curve for CO₂ in France: the role of nuclear energy, *Energy Policy* 38(8), 4057-4063.
- Jahn, D. (1998). Environmental performance and policy regimes: Explaining variations in 18 OECD-countries, *Policy Sciences* 31(2), 107-131.
- Juodis, A., Karavias, Y. & Sarafidis, V. (2021). A homogeneous approach to testing for Granger non-causality in heterogeneous panels, *Empirical Economics* 60(1), 93-112.
- Kaika, D. & Zervas, E. (2013). The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory—Part A: Concept, causes and the CO₂ emissions case, *Energy Policy* 62, 1392-1402.
- Kasman, A. & Duman, Y. S. (2015). CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: a panel data analysis, *Economic Modelling* 44, 97-103.
- Ketenci, N. (2021). Environmental Kuznets curve in the presence of structural breaks: New evidence for individual European Countries, *Environmental Science and Pollution Research* 28, 31520-31538.

- Khan, Z., Ali, M., Jinyu, L., Shahbaz, M. & Siqun, Y. (2020a). Consumption-based carbon emissions and trade nexus: evidence from nine oil exporting countries, *Energy Economics* 89, 104806.
- Khan, Z., Ali, S., Umar, M., Kirikkaleli, D. & Jiao, Z. (2020b). Consumption-based carbon emissions and international trade in G7 countries: the role of environmental innovation and renewable energy, *Science of the Total Environment* 730, 138945.
- King, R. F. & Borchardt, A. (1994). Red and green: air pollution levels and left party power in OECD countries, *Environment and Planning C: Government and Policy* 12(2), 225-241.
- Kirchengast, G., Steininger, K. & Schleicher, S. (2022) Pariser Klimazielweg Klimaschutzzielpfad für Österreich, <https://wegcenter.uni-graz.at/de/downloads/>.
- Köppl-Turyna, M., Berger, J. & Strohner, L. (2023) Auswirkungen der Energiepreisentwicklungen auf Oberösterreichs Wirtschaft, Studie im Auftrag der Industriellenvereinigung Oberösterreich.
- Köppl-Turyna, M., Köppl, S. & Bittó, V. (2022) Herausforderungen in der Finanzierung der Energiewende und Rolle des Risikokapitals, *EcoAustria Policy Note* No. 51.
- Köppl-Turyna, M., Köppl, S. & Christopoulos, D. (2023). How to support cleantech start-ups? Lessons from European venture-capital deals, *EcoAustria Research Paper* No. 25.
- Leal, P. H. & Marques, A. C. (2022). The evolution of the environmental Kuznets curve hypothesis assessment: A literature review under a critical analysis perspective, *Heliyon* 8(11), e11521.
- Lean, H. H. & Smyth, R. (2010). CO₂ emissions, electricity consumption and output in ASEAN, *Applied Energy* 87(6), 1858-1864.
- Li, T., Wang, Y. & Zhao, D. (2016). Environmental Kuznets curve in China: new evidence from dynamic panel analysis, *Energy Policy* 91, 138-147.
- Marangoni, G. & Tavoni, M. (2014). The clean energy R&D strategy for 2 C, *Climate Change Economics* 5(01), 1440003.
- Marsiglio, S., Ansuategi, A. & Gallastegui, M. C. (2016). The environmental Kuznets curve and the structural change hypothesis, *Environmental and Resource Economics* 63, 265-288.
- Mealy, P. & Teytelboym, A. (2020). Economic complexity and the green economy, *Research Policy*, 103948.
- Mehrara, M. & ali Rezaei, A. (2013). A panel estimation of the relationship between trade liberalization, economic growth and CO₂ emissions in BRICS countries, *Hyperion Economic Journal* 1(4), 3-27.

- Minniti, A. & Venturini, F. (2017). The long-run growth effects of R&D policy, *Research Policy* 46(1), 316-326.
- Moyer, J. D. (2023). Modeling transformational policy pathways on low growth and negative growth scenarios to assess impacts on socioeconomic development and carbon emissions, *Scientific Reports* 13(1), 15996.
- Neumayer, E. (2003). Are left-wing party strength and corporatism good for the environment? Evidence from panel analysis of air pollution in OECD countries, *Ecological Economics* 45(2), 203-220.
- Neumayer, E. (2004). The environment, left-wing political orientation and ecological economics, *Ecological Economics* 51(3-4), 167-175.
- Ono, T. & Maeda, Y. (2001). Is aging harmful to the environment?, *Environmental and Resource Economics* 20, 113-127.
- Panayotou, T. (1997). Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool, *Environment and Development Economics* 2(4), 465-484.
- Pao, H. T. & Tsai, C. M. (2010). CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries, *Energy Policy* 38(12), 7850-7860.
- Pao, H. T. & Tsai, C. M. (2011). Modeling and forecasting the CO₂ emissions, energy consumption, and economic growth in Brazil, *Energy* 36(5), 2450-2458.
- Pesaran, M. H., Shin, Y. & Smith, R. P. (1999). Pooled mean group estimation of dynamic heterogeneous panels, *Journal of the American Statistical Association* 94(446), 621-634.
- Popp, D. (2006a). R&D subsidies and climate policy: is there a "free lunch"?, *Climatic Change* 77(3-4), 311-341.
- Popp, D. (2006b). Innovation in climate policy models: Implementing lessons from the economics of R&D, *Energy Economics* 28(5-6), 596-609.
- Saqib, M. & Benhmad, F. (2021). Updated meta-analysis of environmental Kuznets curve: Where do we stand?, *Environmental Impact Assessment Review* 86, 106503.
- Sarkodie, S. A. & Strezov, V. (2018). Assessment of contribution of Australia's energy production to CO₂ emissions and environmental degradation using statistical dynamic approach, *Science of the Total Environment* 639, 888-899.

- Sarkodie, S. A. & Strezov, V. (2019). A review on environmental Kuznets curve hypothesis using bibliometric and meta-analysis, *Science of the Total Environment* 649, 128-145.
- Schwarzbauer, W., Bittó, V. & Koch, P. (2023) Industrie-, Technologie- und Klimapolitik gemeinsam denken, *EcoAustria Policy Note* No 53.
- Scruggs, L. A. (1998). Political and economic inequality and the environment, *Ecological Economics* 26(3), 259-275.
- Scruggs, L. A. (1999). Institutions and environmental performance in seventeen western democracies, *British Journal of Political Science* 29(1), 1-31.
- Sephton, P. & Mann, J. (2016). Compelling evidence of an environmental Kuznets curve in the United Kingdom, *Environmental and Resource Economics* 64(2), 301-315.
- Shahbaz, M. & Sinha, A. (2019). Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions: a literature survey, *Journal of Economic Studies* 46(1), 106-168.
- Shahbaz, M., Mutascu, M. & Azim, P. (2013). Environmental Kuznets curve in Romania and the role of energy consumption, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18, 165-173.
- Shi, A. (2003). The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: evidence from pooled cross-country data, *Ecological Economics* 44(1), 29-42.
- Shuai, C., Shen, L., Jiao, L., Wu, Y. & Tan, Y. (2017). Identifying key impact factors on carbon emission: Evidences from panel and time-series data of 125 countries from 1990 to 2011, *Applied Energy* 187, 310-325.
- Sinha, A. & Sen, S. (2016). Atmospheric consequences of trade and human development: A case of BRIC countries, *Atmospheric Pollution Research* 7(6), 980-989.
- Stern, D. I. (2018). The environmental Kuznets curve, in: Castree, N., Hulme, M. & Proctor, J. D. (Hrsg.) *Companion to Environmental Studies*, 49-54, Routledge.
- Tamazian, A., Chousa, J. P. & Vadlamannati, K. C. (2009). Does higher economic and financial development lead to environmental degradation: evidence from BRIC countries, *Energy Policy* 37(1), 246-253.
- Tisdell, C. (2001). Globalisation and sustainability: environmental Kuznets curve and the WTO, *Ecological Economics* 39(2), 185-196.

Wagner, M. (2015). The environmental Kuznets curve, cointegration and nonlinearity, *Journal of Applied Econometrics* 30(6), 948-967.

Xiao, J., Karavias, Y., Juodis, A., Sarafidis, V. & Ditzen, J. (2023). Improved tests for Granger noncausality in panel data, *The Stata Journal* 23(1), 230-242.

Yandle, B., Vijayaraghavan, M. & Bhattarai, M. (2002). The environmental Kuznets curve. A Primer, *PERC Research Study* 2(1), 1-38.

York, R. (2007). Demographic trends and energy consumption in European Union Nations, 1960–2025, *Social Science Research* 36(3), 855-872.

Zoundi, Z. (2017). CO₂ emissions, renewable energy and the Environmental Kuznets Curve, a panel cointegration approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 1067-1075.

Zugravu-Soilita, N. (2018). The impact of trade in environmental goods on pollution: what are we learning from the transition economies' experience?, *Environmental Economics and Policy Studies* 20(4), 785-827.

ANHANG

Tabelle 12: Hauptschätzungen mit pro-Kopf-Emissionen

| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | ghg_pc | ghg_pc | co2_prod_pc | co2_prod_pc | co2_cons_pc | co2_cons_pc |
| gdp_real_pc | 11.659** (3.166) | 761.952** (3.599) | 14.804*** (5.687) | -27.647 (-0.211) | -14.183* (-2.004) | 164.130 (1.278) |
| gdp_real_pc^2 | -12.561*** (-3.905) | -773.098** (-3.547) | -10.055*** (-4.423) | 30.851 (0.229) | 10.209+ (1.670) | -196.547 (-1.486) |
| trade | -0.000 (-0.124) | -0.066* (-2.298) | -0.007* (-2.464) | 0.013 (0.714) | 0.057*** (7.936) | 0.085*** (4.841) |
| adr | -0.059*** (-3.347) | 1.199 (1.629) | -0.114*** (-9.200) | -0.846+ (-1.861) | -0.257*** (-7.645) | -0.648 (-1.451) |
| pop_dens | -0.030*** (-5.923) | -0.449 (-1.758) | -0.038*** (-10.560) | 0.200 (1.270) | 0.034*** (3.545) | 0.223 (1.438) |
| rnd | 0.779*** (4.198) | 2.025* (2.309) | 0.582*** (4.439) | 0.237 (0.438) | -0.823* (-2.259) | -1.816** (-3.414) |
| gini | -0.092** (-2.721) | -0.019 (-0.096) | -0.040+ (-1.649) | 0.099 (0.798) | 0.069 (1.060) | 0.208 (1.706) |
| renw_s | -0.171*** (-10.636) | -0.382*** (-5.794) | -0.164*** (-14.412) | -0.160** (-3.935) | -0.146*** (-4.608) | -0.072+ (-1.799) |
| Konstante | 21.084*** (12.680) | -178.043** (-3.274) | 20.079*** (17.084) | 33.996 (1.012) | 18.518*** (5.790) | -22.241 (-0.674) |
| # Beobachtungen | 714 | 21 | 714 | 21 | 693 | 21 |
| # Länder | 34 | 1 | 34 | 1 | 33 | 1 |
| FE | Ja | Nein | Ja | Nein | Ja | Nein |
| Zeitreihe | Nein | Ja | Nein | Ja | Nein | Ja |
| R^2 | 0.3931 | 0.8740 | 0.5837 | 0.9483 | 0.2887 | 0.9624 |
| F-Stat | 54.41 | 18.34 | 117.77 | 46.84 | 33.09 | 65.00 |

Anmerkung: + $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$; R^2 (within) in Spalten (1) (3) und (5); Adj- R^2 in Spalten (2) (4) und (6).

Erstellt mit Datawrapper

Tabelle 13: Schätzungen mit länderspezifischen Trends und pro-Kopf-Emissionen

| | (1) | (2) | (3) |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| | ghg_pc | co2_prod_pc | co2_cons_pc |
| gdp_real_pc | 23.256*** (5.474) | 20.455*** (5.795) | 51.079*** (4.432) |
| gdp_real_pc^2 | -5.570+ (-1.659) | -6.160* (-2.208) | -30.366*** (-3.387) |
| trade | -0.003 (-1.008) | 0.006* (2.239) | -0.003 (-0.315) |
| adr | 0.055** (2.886) | -0.047** (-2.950) | -0.098+ (-1.902) |
| pop_dens | -0.099*** (-5.052) | -0.091*** (-5.586) | -0.338*** (-6.515) |
| rnd | 0.050 (0.313) | 0.429** (3.246) | 0.861* (1.970) |
| gini | -0.018 (-0.705) | 0.004 (0.184) | 0.057 (0.817) |
| renw_s | -0.046** (-2.815) | -0.106*** (-7.849) | -0.093* (-2.040) |
| year | 0.098*** (3.543) | 0.045+ (1.951) | 0.051 (0.702) |
| Konstante | -195.752*** (-3.504) | -81.979+ (-1.766) | -92.855 (-0.627) |
| # Beobachtungen | 714 | 714 | 693 |
| # Länder | 34 | 34 | 33 |
| Länder Trends | Ja | Ja | Ja |
| R ² | 0.9938 | 0.9849 | 134.72 |
| F-Stat | 1513.70 | 619.47 | 3437.45 |

Anmerkung: + $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$; Adj-R². Nicht ausgewiesen: Ländertrends

Erstellt mit Datawrapper