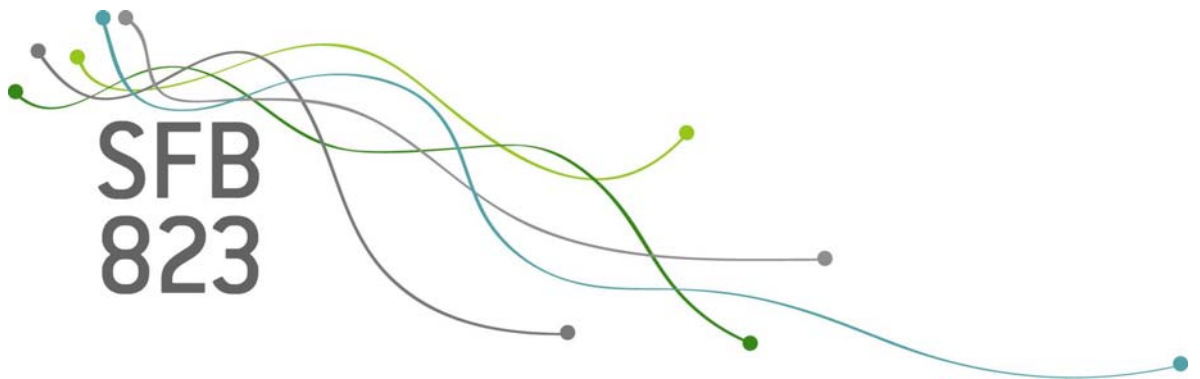


SFB
823

Wirtschaftliche Aktivität und Emissionen: Die Umweltkuznetskurve

Martin Wagner, Fabian Knorre

Nr. 10/2019



Discussion Paper

Wirtschaftliche Aktivität und Emissionen: Die Umweltkuznetskurve

Martin Wagner

Fakultät Statistik

Technische Universität Dortmund

44227 Dortmund, Deutschland

&

Institut für Höhere Studien

1080 Wien, Österreich

&

Bank of Slovenia

1000 Ljubljana, Slowenien

Fabian Knorre

Fakultät Statistik

Technische Universität Dortmund

44227 Dortmund, Deutschland

&

Ruhr Graduate School in Economics

45128 Essen, Deutschland

28. Mai 2019

Zusammenfassung

Seit dem Beginn der industriellen Revolution ist die mittlere globale Temperatur um circa ein Grad Celsius gestiegen. Es steht außer Zweifel, dass dieser Anstieg wesentlich auch durch menschliche Aktivitäten getrieben ist - durch Emissionen von Kohlenstoffdioxid und anderen Treibhausgasen. Wie sehen die Zusammenhänge zwischen wirtschaftlicher Aktivität und Emissionen aus? Steigen die Emissionen zwingend mit steigender wirtschaftlicher Aktivität? In diesem Kapitel wollen wir einige grundlegende Probleme beleuchten, die bei der statistischen - eigentlich ökonometrischen - Analyse dieser Zusammenhänge auftreten. Diese Probleme sind symptomatisch für wirtschaftswissenschaftliche Beziehungen und ein Grund warum sich die Ökonometrie als eigenständige Disziplin etabliert hat.

1 Wirtschaftliche Aktivität und Emissionen

Die Auswirkungen von wirtschaftlicher Aktivität auf die Umwelt werden, mit unterschiedlichen Schwerpunkten und in der einen oder anderen Form, seit Anbeginn der industriellen Revolution untersucht. In diesem Kapitel legen wir den Fokus auf eine globale Frage: Wie hängen die Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO_2) – primär durch die Verbrennung fossiler Energieträger – als wichtigstem Treibhausgas von der wirtschaftlichen Aktivität ab? Die Bezeichnung Treibhausgase stammt von der Tatsache, dass eine erhöhte atmosphärische Konzentration von CO_2 und anderen Treibhausgasen zu einer höheren Temperatur führt. Dies ist im Wesentlichen auf verminderte Wärmeabstrahlung aus der Atmosphäre zurückzuführen.

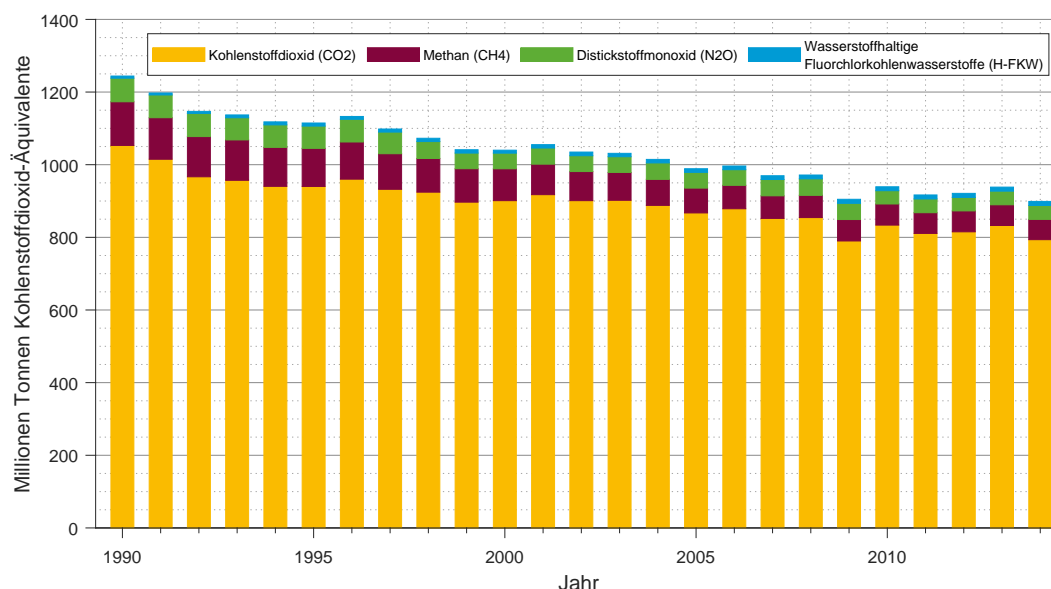


Abbildung 1: Entwicklung der jährlichen Treibhausgasemissionen in Deutschland über den Zeitraum 1990 bis 2014 in Millionen Tonnen CO_2 -Äquivalenten.

Quelle: Umweltbundesamt, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_tab_emi-ausgew-thg-kat_2018.pdf, abgerufen am 21.12.2018.

Abbildung 1 zeigt die jährlichen Treibhausgasemissionen – zusätzlich zu Kohlenstoffdioxid auch Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid (N_2O) und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (H-FKW) – für Deutschland von 1990 bis 2014. Die Entwicklung für Deutschland ist erfreulich. So ist das Bruttoinlandsprodukt (BIP) in diesem Zeitraum um 41% gestiegen, die Treibhausgasemissionen sind jedoch, in CO_2 -Äquivalente umgerechnet, um 28% gefallen. Die Umrechnung in sogenannte CO_2 -Äquivalente erlaubt es Analysen mit einem aggregierten, alle Gase umfassenden Emissionswert durchzuführen. So ist zum Beispiel für Methan der Umrechnungsfaktor

gleich 25, d.h. eine Tonne Methan liefert über einen Zeitraum von 100 Jahren denselben Treibhausgaseffekt wie 25 Tonnen Kohlendioxid. Abbildung 1 zeigt auch, dass der weitaus überwiegende Teil der Treibhausgasemissionen durch CO₂ verursacht wird; im Jahr 2014 in Deutschland 88%.

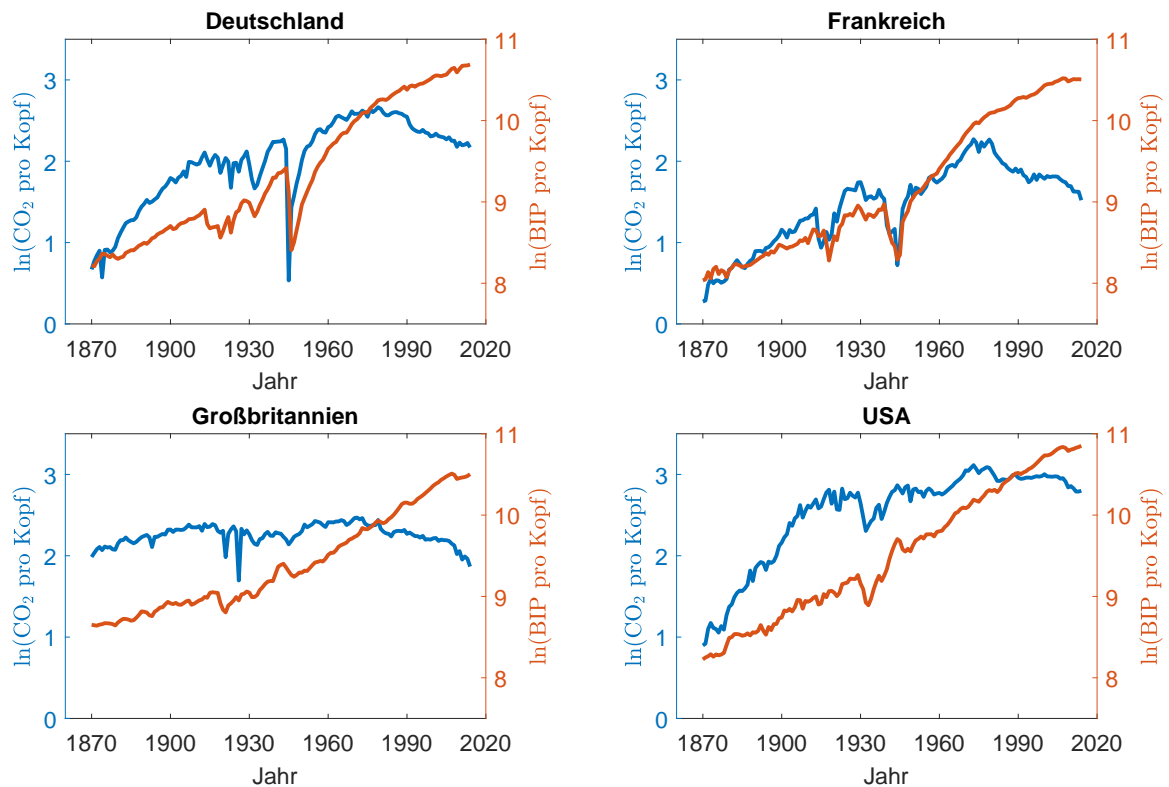


Abbildung 2: Natürlicher Logarithmus des jährlichen Bruttoinlandsprodukts-pro-Kopf und der CO₂-Emissionen-pro-Kopf über den Zeitraum 1870–2014.

Anmerkungen und Quellen: Das Bruttoinlandsprodukt ist gemessen zu konstanten Preisen 2011 in US-Dollars. Die Daten zum Bruttoinlandsprodukt und zur Bevölkerung stammen von der Maddison Project Database, zu finden als Bolt *et al.* (2018). Die Quelle der nationalen CO₂-Emissionen, gemessen in Tonnen, ist Boden *et al.* (2017).

Die fallende Tendenz aus Abbildung 1 ist allerdings kein langfristiges Phänomen, wie man in Abbildung 2 sehen kann, welche Daten seit der Frühzeit der industriellen Revolution um 1870 bis 2014 zeigt. Die Abbildung zeigt, dass – hier dargestellt in logarithmischen pro-Kopf-Größen – die Emissionen in den betrachteten vier Ländern Deutschland, Frankreich, Großbritannien und den USA erst seit den 1970er Jahren sinken. Das BIP-pro-Kopf hingegen wächst seit dem Ende des zweiten Weltkriegs, mit Schwankungen durch Rezessionen und Boomphasen. Das bedeutet – wobei ähnliche Beobachtungen auch für viele andere als die vier

hier betrachteten Länder gelten – dass der Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen-pro-Kopf und dem BIP-pro-Kopf augenscheinlich nichtlinear ist. Nach einer Phase in der sowohl die Emissionen als auch das BIP mehr oder weniger stark gestiegen sind, scheint es seit den 1970er Jahren zu einer Art Entkoppelung gekommen zu sein, mit weiterhin wachsendem BIP-pro-Kopf, aber sinkenden Emissionen-pro-Kopf. Diese Beobachtung gilt nicht nur für die vier betrachteten Ländern, sondern auch eine Reihe weiterer entwickelter Länder, sowie auch bereits in einer Reihe von weniger entwickelten Ländern.

Ein Sinken der Emissionen-pro-Kopf bedeutet aber natürlich nicht, dass die Gesamtemissionsmenge sinkt, das gilt nur, wenn die Bevölkerung nicht schneller wächst als die Emissionen-pro-Kopf sinken. In Deutschland beispielsweise ist die Bevölkerung von 1990 bis 2014 um circa 3,5% gewachsen. Das bedeutet, dass in diesem Zeitraum die Emissionen-pro-Kopf sogar um circa 32% gesunken sind.

Der seit den 1970er Jahren beobachtete veränderte Zusammenhang fällt zeitlich eng zusammen mit der Publikation einiger wegweisender Studien über die Zusammenhänge zwischen Umwelt und Wirtschaft. Hier seien nur kurz die ersten beiden Berichte des Club of Rome (Meadows *et al.*, 1972; Mesarovic und Pestel, 1975) oder auch der sogenannte Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen (1987) erwähnt. Diese Studien haben deutlich auf globale Probleme im Zusammenhang mit Ressourcenverbrauch und auch auf den Klimawandel hingewiesen. All dies hat zu einer veränderten Wahrnehmung bezüglich Umweltproblemen beigetragen. Seit 1988 veröffentlicht das *Intergovernmental Panel on Climate Change* jährliche Berichte über den Klimawandel und es finden regelmäßig globale Klimakonferenzen statt.

Grundlegend gilt, dass das Ausmaß an Umweltbelastung, in diesem Kapitel wie gesagt CO₂-Emissionen, an drei Faktoren hängt. Erstens, natürlich, an der gesamtwirtschaftlichen Aktivität, gemessen durch das Bruttoinlandsprodukt. Dies ist der *Skaleneffekt*. Die Skala der wirtschaftlichen Aktivität hängt nicht zuletzt von der Größe und Entwicklung der Bevölkerung ab. Um diesen Effekt zu separieren, welcher auch in der ökonomischen Analyse üblicherweise gesondert modelliert wird, werden die Analysen typischerweise in pro-Kopf-Größen durchgeführt, so wie auch schon in Abbildung 2 pro-Kopf-Größen dargestellt sind. Zweitens, an der sektoralen Zusammensetzung der Produktion. Unterschiedliche Güter führen, bei gegebener Technologie, zu unterschiedlichen Emissionsintensitäten, also kg CO₂-Emissionen pro Euro oder Dollar Wertschöpfung. Dies ist der *Kompositionseffekt*. Der dritte Effekt ist

der *Technologieeffekt*: Im Laufe der Zeit nimmt die Emissionsintensität im Allgemeinen ab, aus unterschiedlichen Gründen, vielfach auch durch gesetzliche Änderungen, welche oftmals technische Änderungen und Innovationen hervorrufen.

Die prominenteste Hypothese in der Literatur ist die sogenannte *Umweltkuznetskurve*, welche einen invers U-förmigen Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der wirtschaftlichen Aktivität einerseits und einem Maß der Umweltbelastung andererseits postuliert, wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Das Zusammenspiel der drei Kanäle bestimmt das Vorhandensein sowie die Form einer etwaigen Umweltkuznetskurve (UKK).

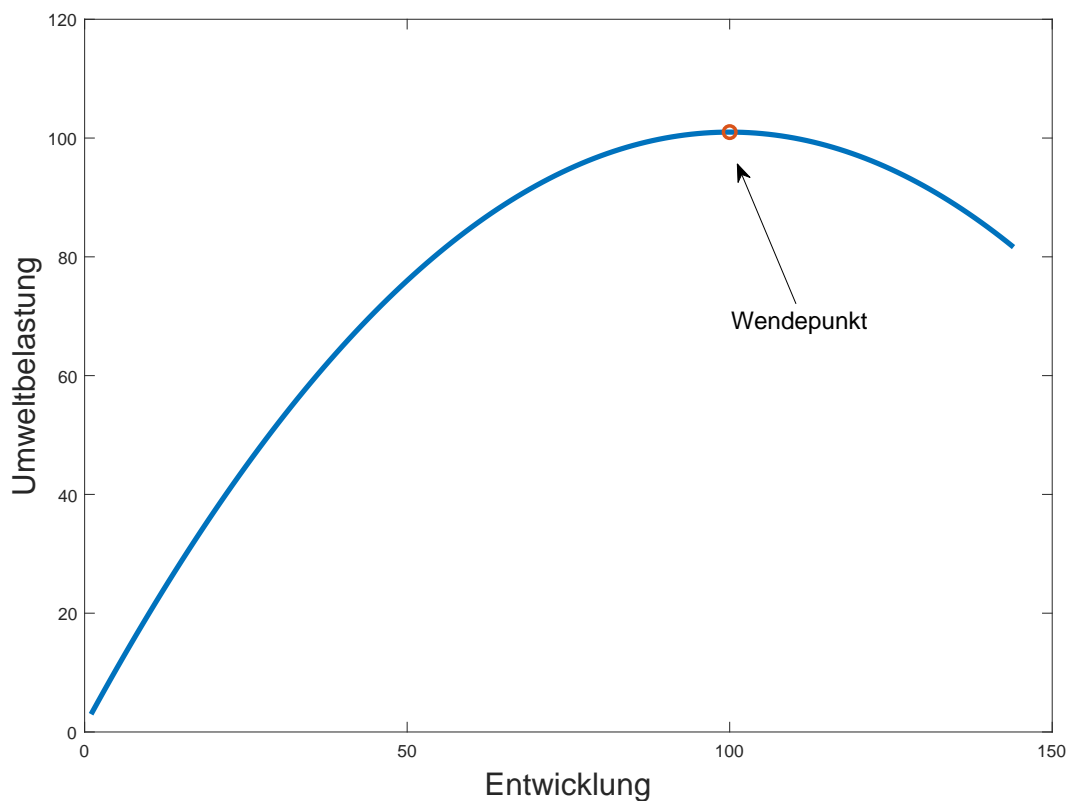


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Umweltkuznetskurve.

2 Ökonometrische Analyse des Zusammenhangs

Um die Umweltkuznetskurvenhypothese in ihrer einfachsten Form zu überprüfen ist also die Frage zu klären, ob in der Tat ein *statistisch gehaltvoller* invers U-förmiger Zusammenhang zwischen dem Logarithmus des BIP-pro-Kopf und dem Logarithmus der Emissionen-pro-

Kopf vorliegt. Abbildung 4 zeigt den Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen aus Abbildung 2, für die vier in diesem Kapitel betrachteten Länder in Form eines Streudiagramms. Mit etwas Großzügigkeit kann man hier jeweils ein inverses U oder zumindest etwas Ähnliches entdecken, allerdings ist die graphische Analyse kein Substitut für eine formal korrekte ökonometrische Analyse.

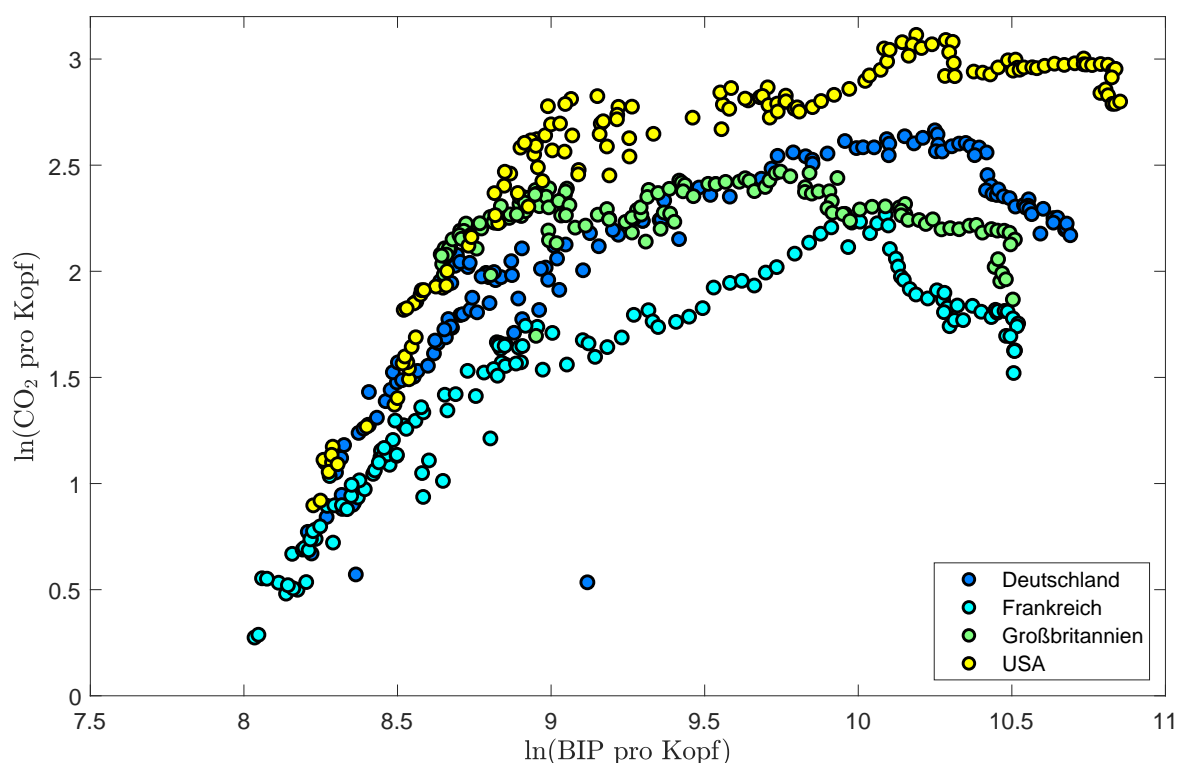


Abbildung 4: Natürlicher Logarithmus des Bruttoinlandsprodukts-pro-Kopf abgetragen gegen den natürlichen Logarithmus der CO₂-Emissionen-pro-Kopf. Der betrachtete Zeitraum ist 1870–2014.

Der einfachste ökonometrische Startpunkt für die Analyse der UKK ist ein *lineares Regressionsmodell* der Form

$$y_t = c + \delta t + x_t \beta_1 + x_t^2 \beta_2 + u_t, \quad (1)$$

wobei y_t den Logarithmus der CO₂-Emissionen-pro-Kopf im Jahr t bezeichnet und x_t den Logarithmus des BIP-pro-Kopf im Jahr t . Wie üblich ist darüber hinaus eine Konstante in der Regressionsgleichung enthalten, sowie ein Zeittrend. Die unbeobachtete Größe u_t bezeichnet den Modellfehler. Wenn wir den obigen Zusammenhang *als korrekt unterstellen* können, ist

der Wendepunkt, vgl. Abbildung 3, gegeben bei $\exp\left(-\frac{\beta_1}{2\beta_2}\right)$ US-Dollars BIP-pro-Kopf; wie erwähnt gemessen in Preisen 2011 in unserer Anwendung.

Das obige lineare Regressionsmodell (1) ist – aufgrund der Eigenschaften der betrachteten Daten – alles andere als einfach zu analysieren, d.h. es ist ein nichttriviales Problem die unbekannt Parameter c , δ , β_1 und β_2 mit *günstigen Eigenschaften* zu schätzen.

Mit günstigen Eigenschaften ist zweierlei gemeint: Zum Einen will man die Eigenschaft der *Konsistenz*. D.h., wenn die Stichprobe größer wird – man also mehr Information zur Verfügung hat – wandern die geschätzten Parameterwerte näher an die wahren unbekannt Werte heran. Dies ist typischerweise eine Minimalanforderung an Parameterschätzung, um sicherzugehen, dass die geschätzten Parameterwerte „in der Nähe“ der wahren unbekannt Werte zu liegen kommen. Es ist z.B. klar, dass nur wenn die geschätzten Parameter in der Nähe der wahren Werte liegen, auch der geschätzte Wendepunkt in der Nähe des wahren unbekannt Wendepunkts zu liegen kommen wird. Zum Zweiten ist es wichtig die Parameter so zu schätzen, dass Hypothesen getestet werden können, bspw. ob etwa $\beta_2 = -0,5$ ist, oder etwas allgemeiner, ob β_2 negativ ist, also eine inverse U-Form vorliegt und keine U-Form, wie im Fall von positivem β_2 . Dies bedeutet im Wesentlichen, dass die Verteilung der geschätzten Parameter hinreichend gut beschreibbar sein muss (etwa muss die Varianz der Verteilung der Parameterschätzung geschätzt werden können).

Da es sich, wie erwähnt, bei Gleichung (1) um ein lineares Regressionsmodell handelt – würde man typischerweise und oftmals zurecht die Methode der (gewöhnlichen) kleinsten Quadrate verwenden, um die Parameter zu schätzen. Die Methode der gewöhnlichen kleinsten Quadrate ist die am meisten verwendete Schätzmethode für Parameter in linearen Regressionsmodellen. Sie ist jedoch in der vorliegenden Situation keine gute Wahl, da die Daten eben Eigenschaften aufweisen, welche die statistische Analyse erschweren und insbesondere die gewöhnliche kleinste Quadrate Methode *ungünstige Eigenschaften* aufweisen lassen.

Wenn wir nochmals Abbildung 2 betrachten, sehen wir deutlich, dass die BIP-pro-Kopf Zeitreihen steigende Trends aufweisen und die Emission-pro-Kopf Zeitreihen eventuell eine invers U-förmige Trendkomponente aufweisen. Diese Trends sind allerdings nicht adäquat durch einen linearen oder quadratischen Zeittrend zu beschreiben, da es große Schwankungen und Veränderungen in der Steigung des Trends über die Zeit gibt; und natürlich speziell für Deutschland und Frankreich große Einbrüche in der Zeit des zweiten Weltkrieges.

Als weitverbreitetes Modell zur Beschreibung eines in dieser Form zufällig trendenden

Verhaltens haben sich in der Literatur sogenannte *stochastische Trends* als ein weit verbreiteter Ansatz durchgesetzt. Dieser Modellrahmen für makroökonomische Zeitreihen wie das BIP ist auch deshalb von großer praktischer Relevanz, weil er im Einklang mit der Beobachtung steht, dass die Wachstumsraten des Logarithmus des BIP-pro-Kopf zufällig um einen konstanten Mittelwert schwanken, die sogenannten Konjunkturzyklen.¹

Ein wesentliches Problem bei trendbehafteten Zeitreihen ist nun das Phänomen der sogenannten *Scheinkorrelation*. Dies ist ein allgemein bekanntes Problem. Ein Beispiel ist die weit verbreitete Erklärung, dass es die Störche seien, welche die Babies bringen. Die Erklärung hier ist – möglicherweise etwas unromantisch – dass in größeren Ortschaften sowohl mehr Dächer (und demgemäß mehr Nistplätze) für Störche zur Verfügung stehen, als auch bei mehr Einwohnern mehr Babies geboren werden. Demgemäß, wenn man verschiedene Ortschaften vergleicht, wird man eine positive Korrelation zwischen der Anzahl der Störche und der Anzahl der Babies beobachten. In Regressionsmodellen mit trendbehafteten Zeitreihen taucht, wenn auch hier karikiert, essentiell dieses Problem auf.

Es ist daher von entscheidender Bedeutung zu unterscheiden, ob in Gleichung (1) eine Scheinrelation vorliegt oder ein sinnvoller Zusammenhang besteht. Im Kontext von stochastisch-trendbehafteten Zeitreihen wird dies typischerweise abgeklärt, indem überprüft wird, ob der Fehlerterm u_t in einem bestimmten Sinn klein ist, d.h. keinen stochastischen Trend enthält.²

Die Ergebnisse von zwei statistischen Tests zur Überprüfung dieser Hypothese finden sich in den letzten beiden Spalten von Tabelle 1. Die Nullhypothese des Tests mit dem Akronym $P_{\hat{u}}$ ist, dass der Fehlerterm einen stochastischen Trend enthält gegen die Alternativhypothese, dass der Fehlerterm keinen stochastischen Trend enthält. Die Null- und Alternativhypothesen des als CT bezeichneten Tests sind genau umgekehrt, dass also der Fehlerterm unter der Nullhypothese keinen stochastischen Trend enthält. Fett gedruckte Teststatistiken bedeuten, dass die jeweilige Nullhypothese zum Signifikanzniveau von 5% verworfen wird.

Starke Evidenz für eine Umweltkuznetskurve der Form (1), mit einem in diesem Sinn kleinen

¹Wenn $x_t = \ln(X_t)$ den natürlichen Logarithmus des BIP-pro-Kopf bezeichnet, dann beschreibt $x_t - x_{t-1} = \ln(X_t) - \ln(X_{t-1}) = \ln\left(\frac{X_t}{X_{t-1}}\right) \simeq \frac{X_t - X_{t-1}}{X_{t-1}}$ ungefähr die Wachstumsrate des BIP-pro-Kopf X_t .

²Die Modellierung von gehaltvollen Beziehungen zwischen stochastisch trendbehafteten Zeitreihen ist in der Literatur unter dem Namen *Kointegrationsanalyse* bekannt. Clive Granger und Robert Engle haben unter anderem für die Entwicklung der Kointegrationsanalyse im Jahr 2003 den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften erhalten.

Fehlerterm, gibt es gemäß der Ergebnisse in Tabelle 1 von den vier betrachteten Ländern nur für Großbritannien. Für die USA hingegen ist die Evidenz gegen das Vorhandensein einer quadratischen UKK stark.

Für Deutschland und Frankreich liefern die beiden Tests widersprüchliche Resultate, für Deutschland verwerfen beide Tests und für Frankreich verwerfen beide Tests nicht. Die Tatsache, dass wir widersprüchliche Ergebnisse der beiden Tests bekommen ist unbefriedigend, in der empirischen Analyse allerdings kein seltener Fall. Es ist auf jeden Fall ein Hinweis darauf, dass man sich das Problem etwas genauer anschauen sollte: Eventuell ist die Umweltkuznetskurve nicht quadratisch. Eventuell gibt es Änderungen in den Parametern über die Zeit. Eventuell beeinflussen sogenannte Ausreißer das Verhalten der Tests, für Deutschland die Daten aus der Zeit des zweiten Weltkrieges. Eventuell fehlen weitere erklärende Variablen; es wurde ja eingangs über die drei Mechanismen gesprochen, deren Zusammenwirken Existenz und Form einer Umweltkuznetskurve ausmachen. All diese Aspekte sollten in einer *vollständigen ökonometrischen* Analyse abgeklärt werden, für welche hier allerdings kein Raum gegeben ist, bevor man zu dem Schluss kommt, dass eine Umweltkuznetskurve vorliegt oder eben nicht. Die Analyse hier hat den Charakter einer ersten Betrachtung – die Appetit auf mehr machen soll.

Land	$\hat{\delta}$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	Wendepunkt	$P_{\hat{u}}$	CT
Deutschland	-0,001	10,80	-0,54	21.950	68,75	0,11
Frankreich	-0,004	11,11	-0,56	20.544	28,33	0,07
Großbritannien	-0,005	9,15	-0,46	21.043	90,12	0,08
USA	0,003	10,30	-0,52	21.565	12,79	0,15

Tabelle 1: Schätz- und Testergebnisse. Die Parameterschätzung erfolgt mit dem FM-CPR Schätzer von Martin Wagner und Seung Hyun Hong (2016). Die beiden letzten Spalten zeigen die Ergebnisse von zwei Tests auf das Vorhandensein einer quadratischen UKK. *Kursive* Formatierung bedeutet Signifikanz auf dem 10% Niveau und **fetter** Schriftsatz Signifikanz auf dem 5% Niveau.

Es ist bekannt, dass die beiden Tests in kleinen Stichproben eine Tendenz aufweisen, eine korrekte Nullhypothese zu oft zu verwerfen. Aus diesem Grund gehen wir vorsichtig davon aus, dass eventuell für Deutschland und Frankreich ebenfalls – wie für Großbritannien – eine quadratische Umweltkuznetskurve gegeben sein könnte, da für diese beiden Länder die Teste-

videnz eben widersprüchlich ist.³ Wenn dem so ist, ist es sinnvoll, sich die Schätzergebnisse in den ersten vier Spalten von Tabelle 1 für diese drei Länder etwas genauer anzusehen.

Die verwendete Schätzmethode, in der Tabelle als FM-CPR abgekürzt, ist eine Weiterentwicklung der Methode der gewöhnlichen kleinsten Quadrate zu einer Schätzmethode, die geeignet ist die Parameter in Beziehungen zwischen *simultan* bestimmten stochastisch trendbehafteten Variablen mit in unserem Sinn günstigen Eigenschaften zu schätzen.

Simultaneität ist ein weiterer wesentlicher (verkomplizierender) Aspekt bei der Analyse von ökonomischen Zeitreihen, dessen Präsenz die Entwicklung geeigneter Schätzverfahren notwendig macht. Was ist damit gemeint? In vielen technischen oder naturwissenschaftlichen Anwendungen ist die Aufteilung in Ursache (erklärende Variable,...) und Wirkung (abhängige Variable,...) sehr einfach und man kann oftmals die erklärende Variable als gegeben annehmen oder in Experimenten sogar nach Wunsch variieren. In den Wirtschaftswissenschaften ist die Situation oftmals fundamental anders.

Das wohl klassischste Beispiel ist der Zusammenhang zwischen Preisen und Mengen. Es ist nicht klar, welche Variable man in einem Regressionsmodell auf die linke und welche man auf die rechte Seite stellen soll. Es ist im Allgemeinen sinnvoll anzunehmen, dass die Preise von den Mengen abhängen (dass also der Preis eine Funktion der Menge ist). Genauso ist aber auch davon auszugehen, dass die Mengen von den Preisen abhängen (dass also die Menge eine Funktion des Preises ist). Wenn es nun Wechselwirkungen in beide Richtungen gibt, spricht man von Simultaneität – und in derartigen Situationen sind die Parameter in Regressionsmodellen mit Methoden zu schätzen, welche die Simultaneität berücksichtigen, die speziell in sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Anwendungen häufig auftritt.

Man spricht im Kontext von Simultaneität auch von *endogenen* erklärenden Variablen, da

³Diese Entscheidung wird auch etwas, wenngleich nicht formal, abgestützt, wenn man die geschätzten Fehlerterme, die sogenannten *Residuen*, in Abbildung 5 im Anhang betrachtet. Für Deutschland sieht man große Ausreißer um den zweiten Weltkrieg. Für Frankreich und Großbritannien schwanken die Residuen im Wesentlichen ohne Trends um Null herum. Für die USA sieht man hingegen eine verkehrtes U in ungefähr der ersten Hälfte der betrachteten Periode. Eventuell ist es also angezeigt für die USA eine Umweltkuznetskurve mit höherem Polynomgrad zu schätzen. Wichtig ist hierbei allerdings, nochmal darauf hinzuweisen, dass die graphische Interpretation der Residuen kein Substitut für korrekte statistische Analyse ist.

Man muss auch noch darauf hinweisen, dass die Fehlerterme zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Allgemeinen – und auch in unserer Anwendung – korreliert sind und eventuell unterschiedliche Varianzen aufweisen. Dies sind weitere Aspekte die typisch für wirtschaftswissenschaftliche Anwendungen sind und in anderen Anwendungsgebieten viel weniger verbreitet sind. So geht man etwa in technischen Anwendungen unter Umständen buchstäblich von unabhängigen und identisch verteilten Meßfehlern aus. Schätz- und Testmethoden müssen so konstruiert werden, dass sie trotz dieser etwaigen Komplikationen verwertbare Ergebnisse liefern. Dies zu tun ist die Aufgabe der Methodenentwicklung in der Ökonometrie.

die erklärende Variable x_t , selbst auch von der abhängigen Variable y_t beeinflusst wird. In unserem Beispiel ist eine Richtung der Abhängigkeit klar, wirtschaftliche Aktivität führt zur Verbrennung von fossilen Ressourcen und damit zu Emissionen. Es ist jedoch auch plausibel anzunehmen, dass Wechselwirkungen auch in die „andere Richtung“ verlaufen. Wenn die Emissionen stark steigen, die Schadstoffbelastung merk- und sichtbar wird, führt dies – eben seit den 1970er Jahren – zu einem Umdenken und demgemäß zu Auswirkungen auf Ausmaß und Gestaltung wirtschaftlicher Aktivität. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass die von uns gewählte Schätzmethode – FM-CPR, entwickelt von Martin Wagner und Seung Hyun Hong (2016) – robust ist in Bezug auf Simultanität. Mittlerweile wissen wir ja: Derartige Methoden zu entwickeln ist eine Kernaufgabe der Ökonometrie.

Was kann man nun zu den Schätzergebnissen für Deutschland, Frankreich und Großbritannien sagen? Zunächst ist zu beobachten, dass der Zeittrend für alle drei Länder einen negativen Koeffizienten aufweist, die Steigung ist allerdings nur für Frankreich und Großbritannien signifikant von Null verschieden. In der Literatur, der oben erwähnte Technologieeffekt, wird davon ausgegangen, dass es eine autonome Tendenz zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz gibt, welche typischerweise mittels eines linearen Zeittrends abgebildet wird. In Deutschland ist dieser Effekt – in unserer einfachen Spezifikation – nicht signifikant gegeben. Die Parameter zu BIP-pro-Kopf und dessen Quadrat sind durchgängig signifikant, und die geschätzten Koeffizienten zum Quadrat sind negativ. Demgemäß wird für alle drei Länder eine invers U-förmige Beziehung modelliert. Die modellbasierten Wendepunkte liegen sehr nahe beieinander in Bezug auf den BIP-pro-Kopf Wert, sind jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten überschritten worden. In Deutschland im Jahr 1971, in Frankreich im Jahr 1973 und in Großbritannien erst im Jahr 1984.

Zu beachten ist an dieser Stelle auch noch, dass die Ergebnisse für die USA sehr ähnlich den Ergebnissen für die anderen Länder sind. In gewissem Sinn ist es zwingend – selbst wenn keine quadratische Umweltkuznetskurve vorliegt – dass die Anwendung von kleinste Quadrate-artigen Methoden zu einer „gut aussehenden Approximation“ führt. Es wird, etwas vereinfacht gesagt, ja nichts anderes gemacht als jene Kurve – bei uns eine quadratische Kurve – durch das Streudiagramm zu legen, die eine minimale Summe der quadrierten Abstände der Punkte im Streudiagramm von dieser Kurve aufweist. Eine in diesem Sinn „beste Kurve“ existiert auch im Fall von Scheinrelationen, in diesem Fall gibt es aber keine sinnvolle Interpretation der geschätzten Parameter.

Ist nun alles gut und die Umweltbelastung geht von jetzt an sozusagen „automatisch“ zurück? Dies wäre ein gefährlicher Trugschluss. Wenn jetzt die Bevölkerung zum Schluss käme, alles läuft auf sinkende Emissionen hinaus und man kann tun und lassen was man will, dann würde genau diese Verhaltensänderung zu einer Änderung des Zusammenhangs zwischen wirtschaftlicher Aktivität und Umweltbelastung führen. Aus dem verkehrten U könnte dann in der Zukunft ein U werden, mit allen negativen Folgen. Die Tatsache, dass sich ökonomische Beziehungen, wenn man sich sozusagen „auf sie verlässt“ fundamental ändern können, ist in der Literatur unter dem Namen *Lucas-Kritik* bekannt, da Robert Lucas derartige Phänomene speziell in makroökonomischen Fragestellungen im Detail analysiert und thematisiert hat.⁴

3 Zusammenfassung

Die Beziehungen zwischen wirtschaftlicher Aktivität und Umweltbelastung, hier Kohlenstoffdioxidemissionen, sind vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels offensichtlich von großer Bedeutung. Die Ökonometrie – wenn man so will die Statistik für Situationen mit heterogenen, endogenen und abhängigen Daten – kann hier wichtige Beiträge liefern. Die Schwierigkeiten die bei der ökonometrischen Analyse von wirtschaftswissenschaftlichen Zusammenhängen auftreten, wurden hier anhand einer exemplarischen Analyse der quadratischen Umweltkuznetskurve illustriert.

⁴Es sei nicht vergessen, zu erwähnen, dass auch Robert Lucas den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften erhalten hat, im Jahr 1995. Ein wichtiger Beitrag für den er den Nobelpreis erhalten hat, war die explizite Modellierung der Tatsache, dass Entscheidungen und Verhalten auch von Erwartungen über die Zukunft abhängen. Empirisch würde dies bedeuten, dass beispielsweise in Regressionsmodellen nicht nur beobachtete Variablen wie das BIP eingehen, sondern auch – um im Beispiel zu bleiben – Erwartungen über das zukünftige BIP. Diese sind aber im Allgemeinen nicht beobachtbar und stehen demgemäß nicht direkt als erklärende Variablen zur Verfügung. Methoden zu entwickeln um derartige Gleichungen zu analysieren ist – richtig geraten – eine weitere wesentliche Aufgabe der Ökonometrie.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich sehr für die finanzielle Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch den Sonderforschungsbereich SFB823 „Statistical modelling of nonlinear dynamic processes“ und der Ruhr Graduate School in Economics. Während des Entstehungsprozesses dieses Artikels fungierte der erste Autor als Chefökonom der Bank of Slovenia. Die in diesem Artikel zum Ausdruck gebrachten Ansichten sind alleinig die der Autoren und nicht notwendigerweise die der Bank of Slovenia oder des Europäischen Systems der Zentralbanken. Für alle verbleibenden Fehler zeigen sich allein die Autoren verantwortlich.

Literatur

- Boden, T.A., Marland, G., Andres, R.J. (2017). *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Bolt, J., Inklaar, R., de Jong, H., van Zanden, J.L. (2018). *Maddison Project Database, version 2018*. Rebasing 'Maddison': New Income Comparisons and the Shape of Long-Run Economic Development. *Maddison Project Working paper 10*.
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, W.W. (1972). *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York.
- Mesarovic, M.D., Pestel, E. (1975). *Mankind at the Turning Point: The Second Report to the Club of Rome*. Hutchinson, London.
- Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_tab_emi-ausgew-thg-kat_2018.pdf. Abgerufen am 21.12.2018.
- Wagner, M., Hong, S.H. (2016). Cointegrating Polynomial Regressions: Fully Modified OLS Estimation and Inference. *Econometric Theory* **32**, 1289–1315.
- Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen (1987). *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford und New York.

Appendix

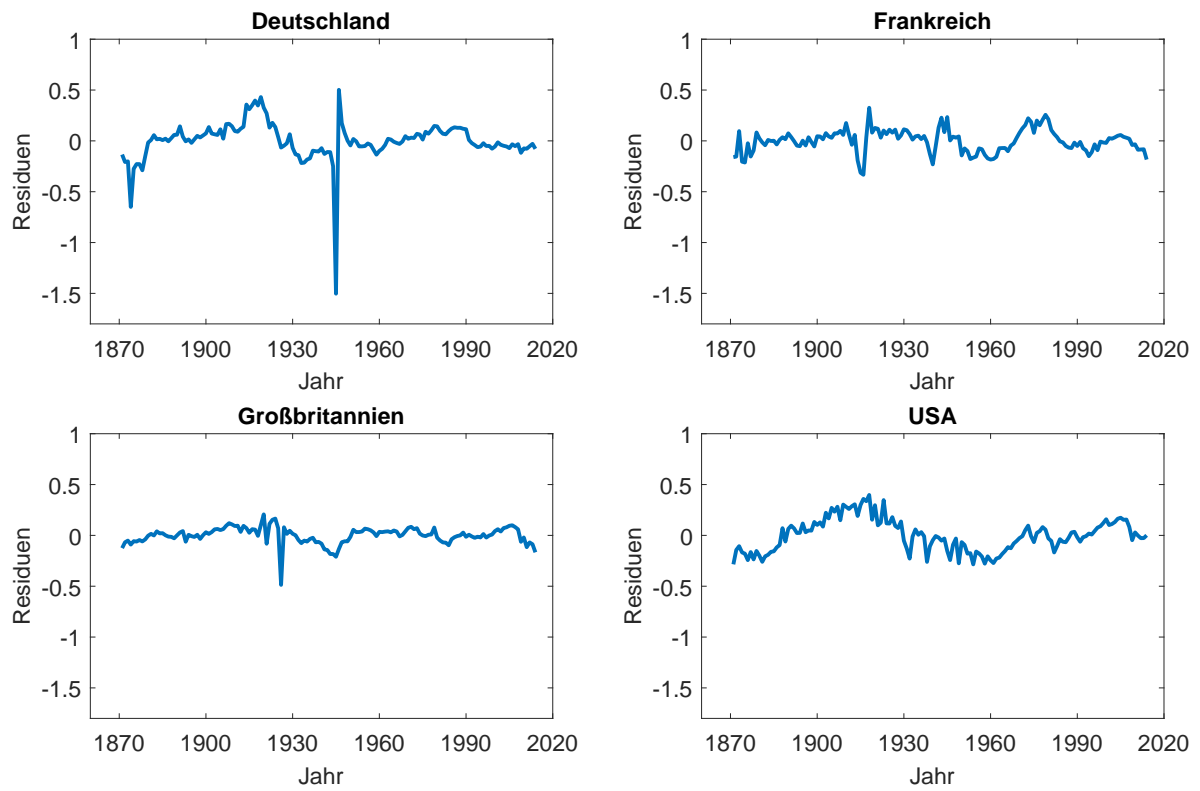


Abbildung 5: Geschätzte Fehlerterme (Residuen) aus der FM-CPR Schätzung von Gleichung (1).

