

Klimawandel

1. 2015 könnte das Jahr sein, in dem (mit dem G7-Gipfel in Elmau und dem Klimagipfel in Paris) das Ende des Zeitalters der fossilen Energie eingeläutet wird. Dann dürfte in den nächsten Jahrzehnten der Bestand an Kohlendioxid bzw. Treibhausgasen in der Atmosphäre nur noch auf einen Wert erhöht werden (etwa das Doppelte der bisher emittierten Menge), bei dem die globale Durchschnittstemperatur auf der Erde zum Ende des Jahrhunderts um höchstens 2° gegenüber der vorindustriellen Zeit steigt, um größere Katastrophen zu vermeiden.

Dies wirft die Frage auf, wie das verbleibende Emissionsbudget auf die kommenden Jahrzehnte aufgeteilt werden soll. Diese Frage ist seit längerem auch ein zentrales Thema der Klimaökonomie. Ihr Anliegen ist es, die zeitliche Verteilung der zulässigen Emissionen nicht willkürlich, sondern auf der Grundlage wissenschaftlicher Kosten-Nutzenüberlegungen vorzunehmen. Nutzen von Emissionen entstehen durch ihre Produktionserträge, Kosten durch die Schäden, die sie in Form negativer externer Effekte anrichten. Der Produktionsertrag lässt sich im Prinzip durch eine Art degressiv steigender Produktionsfunktion $g(e_t)$ ausdrücken, in der e_t die Emission in der Periode t und g die Höhe der damit erzielbaren Produktion bezeichnet. Zukünftige Schäden steigen mit dem Bestand b an Treibhausgasen, der sich im Zeitablauf gemäß $b_{t+1}=b_t+e_t$ entwickelt. Wenn man diese Schäden durch einen Höchstwert b_{\max} beschränkt, dann könnte man z.B. im Planungszeitpunkt t einfach den Gegenwartswert aller zukünftigen Erträge bis zu einem Zeithorizont T bei dieser Beschränkung maximieren:

$$\max \sum R^\tau g(e_{t+\tau}), \quad \text{NB. } \sum e_{t+\tau} = b_{\max} - b_{t-1}, \quad \tau = 0, 1, 2, \dots, T.$$

Dabei bezeichnet $R < 1$ einen Diskontfaktor, der zukünftige Erträge geringer gewichtet, und b_{t-1} den im Planungszeitpunkt t schon vorhandenen Bestand an Treibhausgasen. Die entsprechende Optimalitätsbedingung wäre $g'(e_{t+\tau}) = R^{-\tau} g'(e_t)$. Sie würde verlangen, dass die Emissionen im Zeitablauf abnehmen.

2. Klimaökonomien sind ehrgeiziger. Die geschilderte Lösung beschränkt zwar durch den vorgeschriebenen Höchstbestand die Emissionen, die sich bei rein privatwirtschaftlichen Entscheidungen ergäben, und damit auch zukünftige Schäden. Aber sie stellt diese Schäden nicht direkt in Rechnung. Dafür wäre erforderlich, dass vom Gegenwartswert der Erträge der entsprechende Wert der Kosten abgezogen wird, die durch Emissionen entstehen. Da sie

positiv vom Bestand b an Emissionen abhängen, können sie im Prinzip mit einer Kostenfunktion $c(b)$ erfasst werden, die progressiv mit b steigt. Damit lässt sich in jeder Periode ein Überschuss $g(e)-c(b)$ definieren. In utilitaristischer Tradition kann man dann unter der Wohlfahrt W_t den Gegenwartswert aller diskontierten Überschüsse vom Zeitpunkt t bis zu einem Endzeitpunkt T verstehen:

$$W_t = \sum R^\tau [g(e_{t+\tau}) - c(b_{t-1+\tau})], \quad \tau=0,1,2,\dots,T.$$

Der optimale Wert der Emission e_t ergibt sich dann aus der Bedingung

$$dW_t/de_t = g'(e_t) - q_t (>) = 0, \quad \text{mit} \quad q_t := \sum R^\tau c'(b_{t+\tau}).$$

q_t gibt dabei die abdiskontierten Kosten an, die durch die Emission e_t in allen folgenden Perioden verursacht werden. Wenn, wie anzunehmen, $g'(0)$ hinreichend groß ist, wird sich mit dieser Optimalitätsbedingung für alle t ein positiver Emissionswert ergeben, so dass der Bestand an Treibhausgasen zunimmt, und zwar solange, bis er im Zeitpunkt T auf seinen Maximalwert b_{\max} gestiegen ist. Dieser Zeithorizont kann durch den maximalen Bestand b_{\max} bestimmt werden, bei dem $e=0$ wird und alle folgenden Überschüsse $g(0)-c(b_{\max})$ betragen¹.

Mit dem optimalen Zeitpfad ergibt sich auch der Gegenwartswert q_t der Kosten der Emission e_t . Legt man diesen als Preis für die Emission fest, dann ist ihr privatwirtschaftlicher Ertrag $g(e_t)-q_t e_t$. Er wird maximiert bei einer Wahl von e_t , die sich aus der Bedingung $g'(e_t)-q_t=0$ ergibt. Dies ist aber genau die Optimalitätsbedingung, die auch die Wohlfahrtsfunktion maximiert. Die erwünschte Politik könnte also durch eine entsprechende Steuer auf die Emissionen in Höhe von q_t durchgesetzt werden, die sich (gemäß der Formel für q_t) im Zeitablauf gemäß der Gleichung $q_t - q_{t-1} = r q_{t-1} - c'(b_t)$ entwickelt.

3. So hilfreich eine solche Analyse für ein Verständnis der Erträge und Kosten von Emissionen auch ist, so problematisch ist ihre empirische Umsetzung. Um entsprechende Werte zu ermitteln, muss man nicht nur eine spezifische Wohlfahrtsfunktion mit einem plausiblen Diskontfaktor voraussetzen, sondern man benötigt auch konkrete Angaben über Ertrags- und Kostenfunktionen $g(e)$ und $c(b)$, die vor allem bei letzteren nicht ohne Willkür zu gewinnen sind. Es verwundert daher nicht, dass die vorliegenden Untersuchungen zu recht

¹ Es ist $e_T = b_{\max} - b_{T-1}$ mit $g'(b_{\max} - b_{T-1}) = c'(b_{\max})/r$. Mit dieser Optimalitätsbedingung, einer Gleichung für b_{T-1} , und mit dem Wert des Ausgangsbestands b_t , kann man rekursiv den Zeitpunkt T und die optimalen Werte der Emissionen von t bis zu diesem Zeitpunkt bestimmen. Eingesetzt in die Optimalitätsbedingung für b_{T-2} folgt der Wert dafür in Abhängigkeit von b_{\max} usw. Mit weiterer Rekursion erreicht man schließlich den Wert b_t des in t vorhandenen Bestandes. Daraus ergibt sich die Zahl der Perioden, die von t aus ablaufen, bis T mit b_{\max} erreicht ist.

unterschiedlichen Ergebnissen und Vorschlägen kommen. Deutlich zeigt sich dies schon am Diskontfaktor $R:=1/(1+r)$, der von der Wahl eines Zinssatzes r abhängt. Je höher dieser angesetzt wird, umso niedriger ist der Preis q_t der Emission, umso mehr darf (im Rahmen der Bestandsgrenze) emittiert werden. So hat z.B. der sogenannte Sternreport (Stern 2007) zu einer Kontroverse unter Klimaökonomen geführt, weil er aus Rücksicht auf die Interessen kommender Jahrgänge und Generationen einen Diskontsatz unter dem üblichen Marktzins und damit einen hohen Preis für gegenwärtige Emissionen vorgeschlagen hatte².

Das Hauptproblem einer Quantifizierung betrifft aber die zukünftigen Kosten der Emissionen. Während man empirische Schätzungen von $g(e)$ durch Marktanalysen (z.B. über die Nachfrage nach Emissionsrechten in Abhängigkeit vom Preis) gewinnen kann, sind Schadensfunktionen $c(b)$ auch nicht annähernd objektiv zu ermitteln. Schäden, die durch den erwarteten Anstieg der globalen Temperatur verursacht werden, betreffen ja nicht nur die Produktionsmöglichkeiten, sondern allgemeine Lebensbedingungen, wie Veränderungen von Lebensraum, Gesundheit, sozialen Verhältnissen, die Konflikte bis hin zu kriegerischen Auseinandersetzungen auslösen können und sich nicht überzeugend in Geldbeträge umrechnen und vergleichbar machen lassen.

In den Modellen der Klimaökonomie zur Ermittlung eines optimalen Emissionspfades potenzieren sich diese Schwierigkeiten. Nutzen und Kosten von Emissionen werden hier in neoklassische Modelle gleichgewichtigen Wachstums eingebaut, deren empirische Anwendung selbst schon eine Reihe willkürlicher Annahmen erfordert, wie z.B. die Auswahl und Quantifizierung einer intertemporalen Nutzenfunktion oder einer Funktion des technischen Fortschritts³. Schon ohne die Emissionsproblematik würde die Willkür bei der Wahl solcher Annahmen eine Quantifizierung des Wachstumsprozesses bis zum Ende des Jahrhunderts als höchst zweifelhaftes Experiment erscheinen lassen. Dies ist erst recht der Fall, wenn die Ermittlung eines optimalen Emissionspfades außerdem numerische Schätzungen zukünftiger Schäden und die fragwürdige Wahl einer Wohlfahrtsfunktion

² Inzwischen geht die Tendenz dahin, den Preis q als Wert einer Anlage in Schadensvermeidung durch verringerte Emissionen zu betrachten und den Zinssatz dieser Anlage mit üblichen Methoden der Anlagebewertung zu bestimmen. Wenn verringerte Klimaschäden auch gesamtwirtschaftliche Risiken reduzieren, ist der Zinssatz entsprechend niedriger als der durchschnittliche Marktzins.

³ Im allgemeinen handelt es sich dabei um sogenannte Integrated Assessment Models. Das sind "dynamic computable general equilibrium models", in die naturwissenschaftliche Ergebnisse integriert sind. Die bekanntesten sind die sogenannten DICE-Modelle (Dynamic Integrated Climate Economy), die von Nordhaus entwickelt und weitergeführt worden sind. (Nordhaus 2015).

erfordert. Kritiker kommen daher mit Recht zu dem Ergebnis, dass die gängigen Klimamodelle eine Genauigkeit suggerierten, die schlicht illusorisch und irreführend sei, und dass ihre Vorschläge für Politikempfehlungen deshalb unbrauchbar seien⁴.

4. Wenn Ökonomen einen Emissionspfad vorschlagen wollen, sollten sie sich also mit weniger Ehrgeiz und größerer Bescheidenheit auf begründbare Aussagen beschränken. Dies ist möglich bei Ertragsfunktionen $g(e)$, die sich empirisch schätzen lassen. Auch wenn dies bei den Kosten der Emissionen nicht möglich ist, kann man sie doch durch eine vorgeschriebene Höchstmenge an Treibhausgasen in Grenzen halten. Eine solche Beschränkung der Kosten erweist sich sogar als bedeutsamer als ihre Einzelerfassung, weil sie das Risiko katastrophaler Schäden begrenzt⁵. In den Klimamodellen wird die Höchstmenge wie üblich so gewählt, dass der globale Temperaturanstieg 2° nicht übersteigt. Aber das ist ein Durchschnittswert mit einer nicht unwesentlichen Streuung. So beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass der Anstieg bei diesem Wert auch über 6° liegen und damit katastrophale Folgen haben könnte, nicht weniger als 10%. Um dies zu vermeiden, müsste der zulässige Höchstwert gewissermaßen als Risikoprämie einen Abschlag erhalten, der die Wahrscheinlichkeit einer Katastrophe signifikant verringert.

Mit dieser Maßgabe erscheint es sinnvoll, den eingangs erwähnten Vorschlag aufzugreifen, also unter besonderer Beachtung der Beschränkung der Kosten den Gegenwartswert der Erträge zu maximieren. Im Planungszeitpunkt 0 wäre das entsprechende Kalkül:

$$\max W = \sum R^t g(e_t), \quad \text{NB. } \sum e_t = E, \quad t=0,1,2,\dots,T.$$

Dabei ist E die Differenz zwischen dem vorgegebenen Höchstbestand und dem schon vorhandenen Bestand an Treibhausgasen. Da es nur um die Diskontierung realer Erträge geht, kann man hier problemlos den üblichen Marktzinssatz verwenden. Die Optimalitätsbedingung, $R^t g'(e_t) = g'(e_0)$, zeigt, dass die Emissionen e_t laufend abnehmen und dass jede Emission e_t als Funktion von e_0 und t ausgedrückt werden kann. Mit dieser Bedingung und der Beschränkung ergeben sich drei Möglichkeiten zur Bestimmung eines

⁴ Eine besonders harsche Kritik an den ökonomischen Klimamodellen findet sich in Beiträgen von Stern, Pindyck und Weitzman in einem Forum „How Should We Model Climate Change?“ im Journal of Economic Literature, Sept. 2013, sowie in Wagner und Weitzman (2015) und in Stern (2015).

⁵ Dies wird besonders nachdrücklich hervorgehoben in den Beiträgen von Stern, Pindyck und Weitzman in dem erwähnten Forum über Klimamodelle im Journal of Economic Literature, September 2013, in Wagner und Weitzman (2015) und in Stern (2015, Kapitel 4).

optimalen Emissionspfades e_t von $t=0$ bis T . Man kann erstens den Zeithorizont T vorgeben, bis zu dem noch emittiert werden darf. Dieser könnte zweitens auch durch die Bedingung bestimmt werden, dass dann die Emissionen auslaufen, also $e_T=0$ ist. Schließlich könnte man sogar durch Abwägung zwischen niedrigerem Emissionspfad und längerer Emissionsdauer den Wert von T so bestimmen, dass W maximal ist. Der vorgeschlagene Emissionspfad kann auch hier für jeden Wert von e_t über einen entsprechenden Preis $q_t=g'(e_t)$ durchgesetzt werden. Entscheidend ist in jedem Fall das Ergebnis, dass die Emissionen abnehmen und in ihrer Summe unter einem Maximalwert bleiben, der Katastrophen praktisch ausschließt.

Literatur

NORDHAUS, W., *The Climate Casino. Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*, Yale University Press 2013.

PINDYCK, R.S., *Climate Change Policy: What Do The Models Tell Us?*, *Journal of Economic Literature*, September 2013, 860-872.

Stern, N., *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge and New York. Cambridge University Press 2007.

STERN, N., *The Structure of Economic Modelling of the Potential Impacts of Climate Change: Grafting Gross Underestimation of Risk onto Already Narrow Science Models*. *Journal of Economic Literature*, September 2013, 838-859.

STERN, N. *Why Are We Waiting? The Logic, Urgency, and Promise of Tackling Climate Change*, MIT Press 2015.

WAGNER, G., WEITZMAN, M.L., *Climate Shock. The Economic Consequences of a Hotter Planet*. Princeton University Press 2015.

Weitzman, M.L., *Tail-Hedge Discounting and the Social Cost of Carbon*, *Journal of Economic Literature*, September 2013, 873-890.