



Die Renaissance der Kohle und Chancen globaler Klimapolitik

Prof. Dr. Ottmar Edenhofer, Chefökonom und stellvertretender Direktor am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, TU Berlin, einer von drei Vorsitzenden der Arbeitsgruppe III des Weltklimarates IPCC (in dieser Funktion verantwortlich für die Entstehung des IPCC Sonderberichtes über die Erneuerbaren Energien (SRREN)), Inhaber des Lehrstuhls für die Ökonomie des Klimawandels, Direktor des „Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change“ und Berater der Weltbank in Fragen des Wirtschaftswachstums und Klimaschutzes.

Dipl.-Wirt.-Ing. Jan Steckel, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und am Lehrstuhl für die Ökonomie des Klimawandels,

beide: Technische Universität (TU) Berlin, Berlin, Deutschland.

Die Risiken eines gefährlichen Klimawandels sind für die Menschheit beträchtlich. Der Versuch, den Klimawandel aufzuhalten, stellt die Weltgemeinschaft jedoch vor ein großes Dilemma: Wie kann der Umbau des globalen Energiesystems gelingen, wenn gleichzeitig der Zugang zu günstiger Energie ein Schlüssel zu ökonomischer Entwicklung ist – gerade auch für die Ärmsten? Kohle erlebt eine weltweite Renaissance, die allerdings die globale Klimapolitik wieder vor ungeahnte Herausforderungen stellt: Erstens ist der emissionsintensive Brennstoff durch den anhaltend hohen Ölpreis sehr attraktiv geworden. Zweitens ist Kohle, gerade in Schwellenländern mit hohem Energiebedarf wie China, einfach und günstig zu fördern. In den letzten Jahren hat sie maßgeblich zum starken Emissionsanstieg beigetragen. Ein internationales Klimaabkommen muss im Wesentlichen zweierlei leisten: Der „Deponieraum Atmosphäre“ muss begrenzt werden, damit mögliche katastrophale Konsequenzen des Klimawandels verhindert werden. Dies kann jedoch nur durch internationale Kooperation geschehen. Gleichzeitig müssen emissionsfreie Energieformen wie zum Beispiel erneuerbare Energien gefördert werden.

***The renaissance of coal and chances of a global climate policy:** The risks of a dangerous climate change are considerable for mankind. However, the attempt to halt the climate change creates a major dilemma for the global community: how can the global energy system be converted, if at the same time access to favourable energy is a key to economic development precisely also for the poorest? Coal is experiencing a worldwide renaissance, although the global climate policy is again facing unimagined challenges: firstly the emission-intensive fuel has become extremely attractive as a result of the continuously high oil price. Secondly, coal can be produced easily and at a low cost in emerging countries with a high energy demand such as China. In recent years it has made a significant contribution to the sharp increase in emissions. An international climate agreement must essentially contain two requirements: the „atmospheric dumping area“ must be limited to prevent possible disastrous consequences of climate change. However, this can be achieved only by international cooperation. At the same time emission-free forms of energy such as renewable energy must be produced.*

Gefährlicher Klimawandel – Was ist das?

Klimawissenschaftler bezweifeln nicht mehr ernsthaft, dass der Anstieg der globalen Mitteltemperatur hauptsächlich durch den Menschen und vor allem die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas verursacht wird. Andere Faktoren wie die Sonne beeinflussen zwar ebenfalls die Temperaturen auf der Erdoberfläche. Ihr Einfluss ist aber im Vergleich zu den so genannten Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂) oder Methan, die vor allem bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen, sehr gering. Seit der Industrialisierung hat sich die Erde bereits um 0,7°C erwärmt. Und für den Verlauf des 21. Jahrhunderts sind ohne klimapolitische Maßnahmen weitere 4°C nicht unwahrscheinlich [1]. Eine darüber hinausgehende Erderwärmung kann aufgrund von Unsicherheiten über das Verhalten des Klimasystems nicht ausgeschlossen werden. Der Ursachenskeptizismus in der Klimadebatte ist durch eine erdrückende Evidenz zurückgewiesen worden. Die oben erwähnten Ergebnisse des Weltklimarats (Intergovernmental Panel on Climate Change,

IPCC) wurden kürzlich von einem großangelegten Projekt an der Berkeley Universität unter Leitung von Richard A. Muller bestätigt. Dieses ist unter anderem von der der „Tea-Party“ nahe stehenden Koch-Stiftung finanziert worden [2, 3].

Nun wird jedoch bestritten, dass die Folgen des Klimawandels ein Grund zur Sorge sind. Dieser Klimafolgenskeptizismus hat öffentlich an Zustimmung gewonnen. Auch der Weltklimarat (IPCC) wurde gerade darum kritisiert, weil er angeblich systematisch die Folgen des Klimawandels übertreibe und die so genannten Worst-Case-Szenarien bevorzugt darstellen würde. Die Klimafolgenskeptiker verneinen zwar nicht, dass hauptsächlich der Mensch für den Klimawandel verantwortlich ist. Sie bestreiten jedoch, dass die Folgen des Klimawandels bedrohlich sind. Die Folgenskeptiker berufen sich dabei auf die durchschnittlichen Schäden und vernachlässigen darüber die Möglichkeit eines Worst-Case-Szenarios. Dies wäre jedoch so, als würde man die Höhe der Deiche nach der Durchschnittshöhe von Fluten ausrichten. Die Wahrnehmung dieser Skeptiker krankt außerdem daran, dass die Schäden ungleich verteilt sind: So treffen Dürren und

Überschwemmungen arme Länder besonders hart, da deren Wirtschaft stark von der Landwirtschaft abhängt. Reiche Länder dagegen können sich bei Hitzewellen Klimaanlagen in ihren Häusern leisten und haben daher weniger Tote zu beklagen als die Entwicklungsländer. Vor dem Hintergrund des Risikomanagements ist es also durchaus vernünftig, auch die Worst-Case Szenarien darzustellen. Daher ist es falsch, wollte man dem IPCC vorwerfen, er benutze die Worst-Case Szenarien zu alarmistischen Zwecken. Diese Kritik wurde durch mehrere Expertengremien zurückgewiesen.¹

Eine mögliche Reaktion auf die Unsicherheit über die genauen Folgen der Erderwärmung ist das Plädoyer, keine einschneidenden Emissionsreduktionen vorzunehmen. Denn, so das Argument, Klimaschutz sei kostspielig, während man sich ja an den Klimawandel auch anpassen könne. Anpassungsmaßnahmen ließen sich auf lokaler Ebene bewältigen und müssten nicht in komplizierten internationalen Vereinbarungen abgestimmt werden. Höhere Deiche, neue Bewässerungssysteme, gegen Trockenheit resistente Saatsorten könnten den lokalen Gegebenheiten entsprechend angepasst werden. Und die Betroffenen hätten ein Eigeninteresse an der Durchführung solcher Maßnahmen. Auf den ersten Blick klingt dieses Argument vernünftig. Allerdings kann es nur gelten, wenn gesichert ist, dass die Anpassung an den Klimawandel auch bei einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur von mehr als etwa 4 bis 5°C – oder mehr – noch zu moralisch akzeptablen Kosten möglich ist. Wenn dies nicht der Fall ist, dann wäre die Menschheit einem irreversiblen Klimawandel ausgesetzt, den sie nicht mehr handhaben könnte. Es wird kaum bestritten, dass diese Möglichkeit einer Zerstörung des Planeten gleichkäme. Allerdings kann man einwenden, dass die Wahrscheinlichkeit hierfür sehr gering ist.

Damit stellt sich die Frage, wie die Menschen in rationaler Weise mit Ereignissen umgehen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit gering, deren Schadenspotenzial jedoch sehr groß ist. Martin

Weitzman von der Harvard Universität zeigt [4], dass die herkömmlichen Methoden der Risiko- und Entscheidungstheorie versagen, wenn mit Klimafolgen gerechnet werden muss, die den Planeten zerstören können – und wenn diese Zerstörung unbedingt verhindert werden soll [5]. Unter diesen Voraussetzungen kann man den zusätzlichen Schaden einer Tonne CO₂ nicht mehr gegen die zusätzlichen Kosten der Vermeidung dieser Gasmenge abwägen. Denn dieses Kalkül garantiert nicht, dass eine „Katastrophe“ vermieden wird. In der Tat hat die Klimaforschung solche Ereignisse bereits identifiziert: Die teilweise irreversiblen „Kippschalter“ im Erdsystem, die jenseits (unsicherer) Temperaturschwellen aktiviert werden können. Dazu gehört unter anderem das Abschmelzen des Grönlandeisschildes und des Westantarktischen Eisschildes. Dies könnte jeweils zu einem Anstieg des globalen Meeresspiegels um mehrere Meter führen. Ein weiteres Beispiel ist das Umkippen der Thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik und der daraus resultierende Abfall der Durchschnittstemperaturen in Europa. Oder was passiert bei der Vertrocknung des Amazonasregenwalds? [6] All dies könnte das Habitat, in dem die Menschheit seit dem Holozän lebt, schwer schädigen oder ganz zerstören. Der genaue Schwellenwert, an dem diese Kippschalter aktiviert werden, ist jedoch unbekannt. Beste Schätzungen für das Abschmelzen des Grönlandeisschildes liegen beispielsweise bei einem Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 1 bis 2°C gegenüber dem aktuellen Temperaturniveau. Ohne Klimapolitik aber ist bis zum Jahr 2100 eine Erderwärmung von bis zu 4°C oder mehr zu erwarten [1].

Das Risiko der gefährlichen Emissionsreduktion

Aus der Unsicherheit über die Folgen des Klimawandels ergibt sich daher eine andere Schlussfolgerung: Der Klimawandel sollte zumindest so weit begrenzt werden, dass irreversible und potenziell extrem hohe Schäden ausgeschlossen werden können. Die Kosten des Klimaschutzes sind dann als eine Versicherung gegen einen katastrophalen Klimawandel zu betrachten. Auch wenn sich in der Zukunft herausstellen sollte, dass gefährlicher Klimawandel weniger wahrscheinlich ist als befürchtet und die Kosten des Klimaschutzes höher sind als erhofft, ist es angesichts des heute verfügbaren Wissens rational, sich gegen eine Menschheitskatastrophe zu versichern. Das im so genannten Kopenhagen Akkord immerhin erwähnte globale 2°C-Ziel hat genau diese Funktion. Es soll das Risiko gefährlichen Klimawandels begrenzen. Erst wenn katastrophale Risiken ausgeschlossen sind, kann man sinnvollerweise fordern, dass sich Menschen an den unvermeidlichen Restklimawandel anpassen [7].

Darüber hinaus wird es in den nächsten Jahren zu einer heftigen Debatte kommen, wie viel die Menschheit zusätzlich zu einem solchen „minimalen Versicherungsschutz“ zu zahlen bereit ist. So argumentieren die Inselstaaten bereits jetzt, dass das 2°C-Ziel unzureichend ist, weil damit das

¹ Das ausführlichste und wichtigste Gutachten zu Management und Verfahren des IPCC hat der Inter Academy Council (IAC) – die internationale Organisation der nationalen Wissenschaftsakademien – am 30. August 2010 vorgelegt. Der IAC hat den IPCC als eine wichtige soziale Innovation im Wissenschaftssystem qualifiziert. Auch stufte er die bislang vier Sachstandsberichte als erfolgreich ein. Dennoch hat er eine Reihe von Vorschlägen zur Verbesserung des Managements gemacht. Diese Vorschläge wurden sowohl von der Führung des IPCC als auch von der Plenarsitzung des IPCC, die im Oktober 2011 in Busan stattfand, sehr positiv aufgenommen. Insgesamt ist der IPCC aus dieser Krise gestärkt hervorgegangen. (InterAcademy Council: Climate change assessments. Review of the processes and procedures of the IPCC. Im Internet: <http://reviewipcc.interacademycouncil.net/report.html>). Darüber hinaus haben im Jahr 2010 mehrere Gremien die Arbeit des IPCC bewertet. Die niederländische Umweltbehörde „PBL Netherlands Environmental Assessment Agency“ kommt in ihrem im Juli 2010 veröffentlichten Bericht zum Ergebnis, dass trotz kleinerer Fehler in Einzelfragen die Hauptaussagen des Vierten Sachstandsberichts zu den Folgen des Klimawandels alle korrekt sind. Der PBL Bericht weist jedoch auch darauf hin, dass die Zusammenfassung (nicht der Haupttext) des Vierten Sachstandsberichts unter Zustimmung der am IPCC beteiligten Regierungen vor allem die Risiken des Klimawandels in den Blick genommen hat. Die inhaltliche Robustheit der IPCC-Aussagen wurden zudem durch eine umfassende Untersuchung der US-Umweltschutzbehörde (EPA) bestätigt (für die EPA Untersuchung und Hinweise auf weitere Studien siehe: <http://epa.gov/climatechange/engagement/petitions.html>).

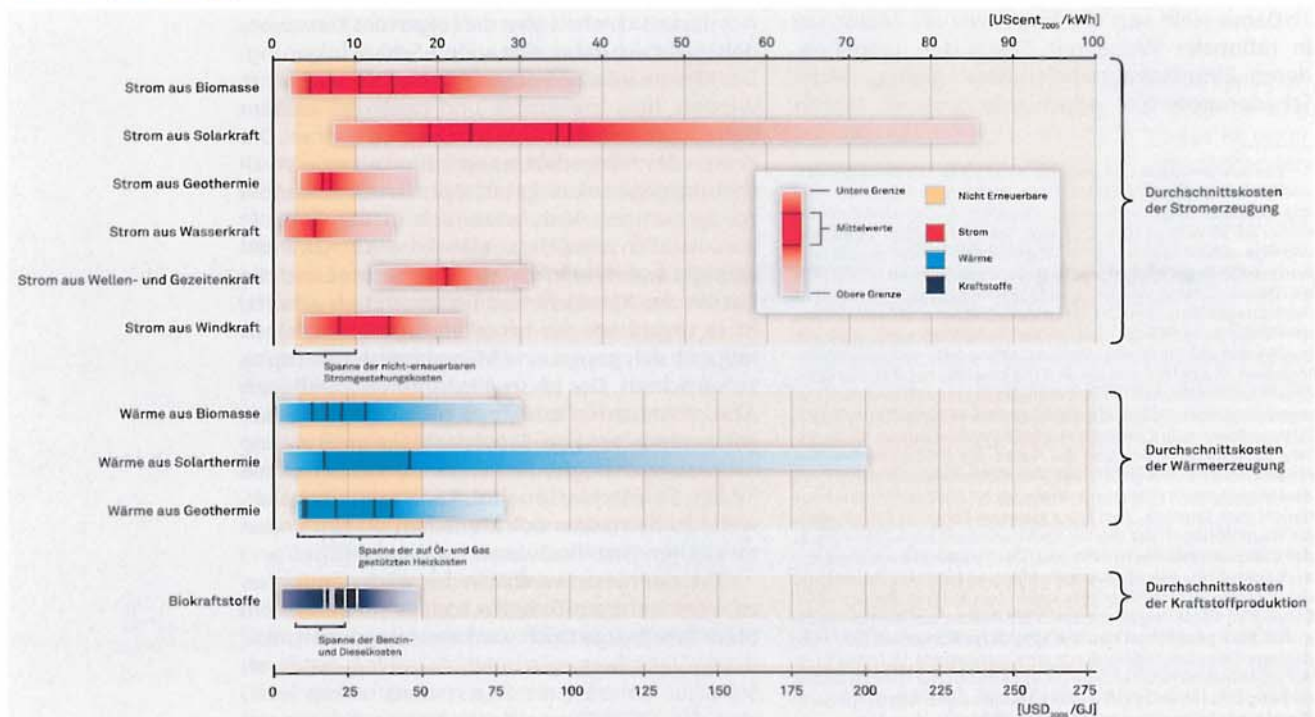
Verschwinden kleinerer Inseln wie etwa Tuvalu oder der Malediven praktisch in Kauf genommen wird. Die Industrie- und Schwellenländer dagegen befürchten, dass bereits die Einhaltung des 2°C-Ziels ihre wirtschaftliche Entwicklung beschränkt. Andere Entwicklungsländer sind besorgt, dass ambitionierter Klimaschutz ihr Aufschließen zu den entwickelten Ländern verhindert oder zumindest stark verzögert. Vom fünften Sachstandsbericht des Weltklimarats, der im Jahr 2014 veröffentlicht werden soll, wird erwartet, dass er die wissenschaftlichen Grundlagen für diese Diskussion bereitstellt.

Ein Grund für diese Furcht besteht darin, dass sich in das Gedächtnis der Menschheit eingebrannt hat, dass die Verbrennung fossiler Energieträger damit einhergeht, dass Armut überwunden und Wohlstand erreicht wird. In der Tat besteht zwischen Emissionen aus fossilen Energieträgern und dem Pro-Kopf-Vermögen eine nahezu eins-zu-eins-Beziehung: Eine 1 %-Erhöhung des Pro-Kopf-Vermögens hat in der Vergangenheit zu einer 1 %-Erhöhung der Emissionen geführt [9]. Diese Korrelation lenkt allerdings von den dahinter liegenden Mechanismen für ökonomische Entwicklung ab: Nicht etwa Emissionen sind entscheidend für Entwicklungsprozesse, wohl aber der Zugang zu möglichst günstiger Energie. Wie in dem Bild 1 zu sehen ist, sind zwar ausgewählte erneuerbare Energieformen auch ohne CO₂-Preise oder Subventionen günstiger als fossile Alternativen. In der Regel sind konventionelle Energieträger jedoch nach wie vor kostengünstiger. Dies führt zu einem tragischen Zielkonflikt zwischen Wirtschaftswachstum und Klimapolitik.

Um diese Aussage besser nachvollziehen zu können, soll hier kurz die Rolle der Energie in Entwicklungsprozessen beleuchtet werden. Die Modernisierung von Volkswirtschaften lässt sich durch einen Strukturwandel beschreiben, bei dem die Bedeutung des Landwirtschaftssektors ab- und die des Industrie- sowie Dienstleistungssektors zunimmt. Dieser Strukturwandel führt jedoch nicht zu einem sinkenden Energieverbrauch, sondern – im Gegenteil – zu einem rapiden Anstieg. Für die Modernisierung von Volkswirtschaften ist ein Minimum an Energieverbrauch unverzichtbar. Keine Volkswirtschaft hat in der Vergangenheit – nach Kriterien der Weltbank – hohe oder sehr hohe Entwicklungsstandards erreicht, bevor sie eine Schwelle von um die 40 GJ pro Kopf überschritten hatte [11]. Während in armen Ländern beispielsweise das Sammeln von Feuerholz eine große Rolle spielt, wird Energie mit steigendem Wohlstand zunehmend durch kommerzielle Brennstoffe und Elektrizität bereitgestellt. Das setzt wiederum Zeit und Ressourcen für andere Aktivitäten wie Bildung frei [12].

Die flexible und ausreichende Bereitstellung von Energie verbessert nicht nur die Produktivität von Energiedienstleistungen, sondern wirkt sich ebenfalls positiv auf die Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital aus. Das beschleunigt wiederum den technologischen Wandel und die Fähigkeit, neue Technologien zu absorbieren [13]. Eine Verteuerung dieses für Entwicklungsprozesse wichtigen Produktionsfaktors führt verständlicherweise zur Befürchtung, dass der Modernisierungsprozess

Bild 1. Durchschnittskosten der Erzeugung verschiedener erneuerbarer Energieformen (am Ort der Erzeugung) für Strom (oben), Wärme (mitte) und Kraftstoffe (unten) in US-\$/GJ im Vergleich zu nicht erneuerbaren Energiequellen (grafisch hervorgehobene Fläche). Der Ansatz der hier gezeigten Durchschnittskosten berücksichtigt keine Steuern oder Subventionen.
Quelle: IPCC (2012, S. 42) [10].



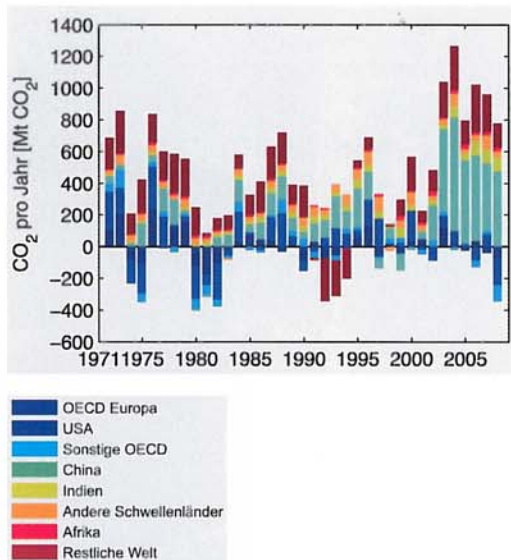


Bild 2. Veränderung der globalen CO₂-Emissionen nach Ländern beziehungsweise Ländergruppen [17]. Die Schwellenländer Mexiko, Brasilien, Südkorea, Indonesien und Südafrika sind unter „Andere Schwellenländer“ zusammengefasst [18].

zum Erliegen kommen könnte. Wirtschaftswachstum ist in den nächsten Dekaden jedoch für die Entwicklungs- und Schwellenländer unverzichtbar. So kann seit einigen Jahren beobachtet werden, dass sich gerade die Länder Afrikas südlich der Sahara ihrer Jahrzehnte währenden ökonomischen Stagnation entkommen. Die Wachstumsraten des Sozialprodukts sind seit einigen Jahren konstant hoch. Einzelne Länder der Region zeigen sogar die höchsten Wachstumsraten weltweit. Diese ersten ökonomischen Erfolge wirken sich positiv auf die Armutsbekämpfung aus und gleichzeitig nehmen ausländische Direktinvestitionen zu [14]. Wachstumsverzicht ist, zumindest für Entwicklungsländer, keine Option. Eine realistische Klimapolitik wird dem Rechnung tragen müssen.

Das Beispiel China

Der wirtschaftliche Aufstieg Chinas ist eine einzigartige Erfolgsgeschichte: Während Anfang der 1990er-Jahre noch fast 60 % der Chinesischen Bevölkerung unterhalb der Armutsgrenze lebte [15], und damit prozentual mehr als damals in Sub-Sahara Afrika, sind es heute nur noch 15% mit stark fallender Tendenz. In Afrika sind die Armutsraten derweil mit über 50 % der Bevölkerung weiterhin dramatisch hoch [16].

Die hohen Wachstumsraten und die Erfolge in der Armutsbekämpfung sind um den Preis einer bisher nie gekannten Kohlerenaissance erkaufte worden. Wie sehr die Industrialisierung Chinas die Entwicklung der globalen Kohlenstoffemissionen beeinflusst hat, zeigt ein Blick auf das Bild 2. Vor allem seit dem Jahr 2000 treiben die Emissionen in China die globalen Emissionen massiv an. Über die Hälfte des jährlichen globalen Anstiegs der

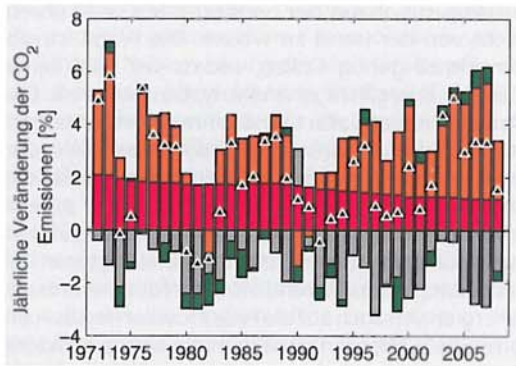
Kohlenstoffemissionen können seitdem in China verortet werden. Andere Schwellenländer spielen dabei eine nur vernachlässigbare Rolle.

Die Ursachen dieses dramatischen Anstiegs lassen sich erkennen, wenn man die höheren Emissionen in vier Komponenten zerlegt: Wirtschaftswachstum, Bevölkerungswachstum, Energieintensität und Kohlenstoffintensität [19]. Die Energieintensität beschreibt dabei die Menge an Energie, die benötigt wird, um eine Einheit BIP zu generieren. Unter Kohlenstoffintensität verstehen wir hier die Kohlenstoffemissionen pro Einheit Energie. Die Ergebnisse für die Volksrepublik China sind sowohl global als auch gesondert in dem Bild 3 dargestellt.

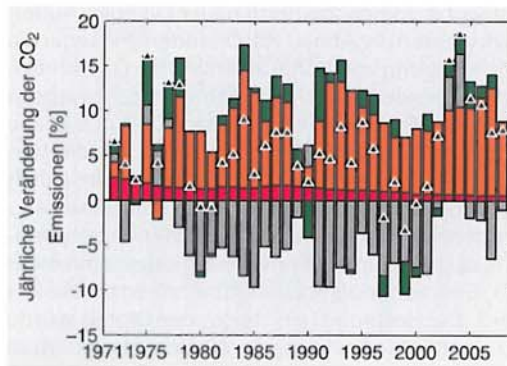
Das Bild 3 zeigt, dass in der Vergangenheit eine verringerte Energieintensität (durch die Nutzung effizienterer Prozesse und Technologien) sowie phasenweise Senkung der Kohlenstoffintensität durch Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum überkompensiert wurden. Während in den 1970er- und 1980er-Jahren das globale Energiesystem hauptsächlich durch den Ausbau emissionsarmer Kernkraft in den entwickelten Staaten dekarbonisiert worden ist, hat vor etwa einem Jahrzehnt eine massive Trendwende eingesetzt. Diese wird hauptsächlich durch einen verstärkten Einsatz der Kohle getrieben, deren Ausbau in den 1990er-Jahren im Vergleich zu anderen Jahrzehnten zeitweise gestoppt schien. Seit Anfang des letzten Jahrzehnts erleben wir jedoch eine massive Renaissance der Kohle.

Im Hinblick auf China hat die außerordentliche ökonomische Entwicklung zu einem massiven Anstieg der Kohlenstoffdioxidemissionen geführt. Diese wurde bis zur Jahrtausendwende durch eine verbesserte Energieintensität, die in den 1980er-Jahren noch dramatisch schlecht war, kompensiert. Seit dem Jahr 2000 aber hat sich die Energieintensität kaum noch verbessert. Gleichzeitig führte eine zunehmend konstante Karbonisierung – wiederum vor allem durch den vermehrten Einsatz von Kohle – zu einem rasanten Anstieg der CO₂-Emissionen von durchschnittlich über 10%/anno. Eine Trendwende ist ohne politische Eingriffe kaum zu erwarten. Vielmehr könnte Kohle, getrieben durch die hohen Ölpreise, sogar noch verstärkt zur Gewinnung synthetischen Treibstoffs genutzt werden.

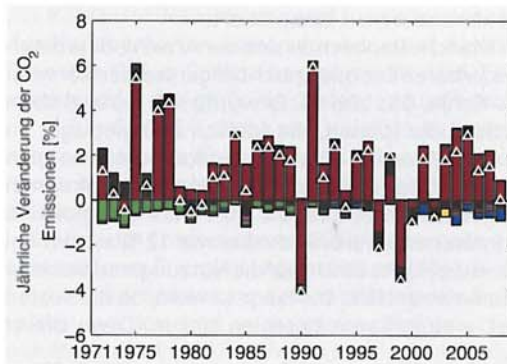
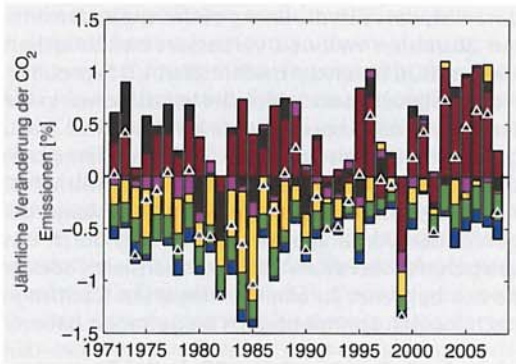
Natürlich stellt sich die Frage nach den Gründen für dieses starke Emissionswachstum. Einige argumentieren, dass China sich zur „Werkbank der Welt“ entwickelt. Insbesondere emissionsintensive Prozesse werden nach und nach hierhin ausgelagert. Würde der Kohlenstoff, der für die Herstellung von Exportprodukten emittiert wurde, den Exportländern angerechnet, sähe die Bilanz ganz anders aus. In diesem Fall wären Chinas Emissionen in einem wesentlich geringeren Maße angestiegen, als es der Blick auf die nationalen Statistiken suggeriert [22, 23]. Diese Argumentation greift jedoch zu kurz. Die entscheidende Frage ist, ob China im Vergleich zu seiner heimischen Produktion emissionsintensivere Produkte exportiert oder ein besonders karbonintensives Energiesystem aufweist. Neuste Studien weisen auf letzteres hin



▲ Veränderung der CO₂ Emissionen
 ■ Bevölkerung
 ■ BIP pro Kopf
 ■ Energieintensität
 ■ Kohlenstoffintensität



■ Kohle
 ■ Erdöl
 ■ Erdgas
 ■ Kernkraft
 ■ Biomasse (inkl. Abfälle)
 ■ Erneuerbare (inkl. Wasserkraft)



a) Dekomposition nach Kaya: Global
 b) Dekomposition nach Kaya: China
 c) Dekomposition der Kohlenstoffintensität: Global
 d) Dekomposition der Kohlenstoffintensität: China

Bild 3. Dekompositionsanalyse nach Kaya (obere Reihe) sowie eine weitere Dekomposition der Kohlenstoffintensität nach Energieträgern (untere Reihe) für die gesamte Welt (linke Spalte) sowie China (rechte Spalte). Man beachte die unterschiedliche Skalierung der Y-Achsen.

Datenquelle: Internationale Energieagentur [20].

[24]. Ebenso kommen andere Studien zum Schluss, dass vor allem der Strukturwandel in China die Karbonisierung des Energiesystems antreibt und weniger die Spezialisierung auf den Export karbonintensiver Güter [25, 26].

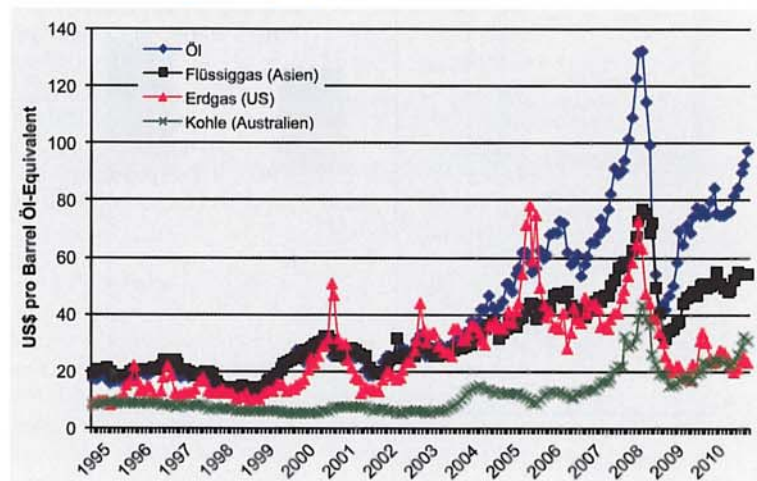
Herausforderungen der Technologiepolitik

Es ist offensichtlich, dass die Renaissance der Kohle das größte Risiko für die internationale Klimapolitik ist. Einige Beobachter hegen die Hoffnung, die Knappheit von Kohle, Öl und Gas werde die Weltwirtschaft zum Umstieg auf kohlenstoffarme Technologien zwingen – vor allem in Richtung erneuerbare Energien. In diesem Zusammenhang wird immer wieder darauf hingewiesen, dass trotz der Wirtschaftskrise der Ölpreis relativ konstant bei über 100 US-\$ verharrt (Bild 4).

Zwar spricht vieles dafür, dass die Zeit des billigen Öls zu Ende geht. Es wäre jedoch ein fataler Fehlschluss, wollte man daraus ableiten, damit ginge auch schon das Zeitalter der fossilen Energieträger

zu Ende. Denn wenn Öl knapper wird und der Ölpreis steigt, erhöhen sich auch die Investitionen in

Bild 4. Preise für fossile Brennstoffe von 1995 bis 2011. Quelle: Internationaler Währungsfonds [27].



die Suche und Ausbeutung neuer Ölfelder. Außerdem werden der Abbau von Ölsanden und sogar die Verflüssigung von Kohle als Ersatz für Öl rentabel. Der steigende Ölpreis hat in den letzten fünf Jahren auch den Gaspreis steigen lassen. Dadurch ist die Kohle im Wettbewerb mit dem Gas für die Verstromung wieder wirtschaftlich geworden. Durch den Anstieg des Ölpreises sind die Emissionen also tendenziell eher gestiegen. Die Daten zeigen deutlich, dass eine Einheit Primärenergie heute mit mehr CO₂-Emissionen als noch vor fünf Jahren produziert wird. Die Hoffnung, ein steigender Ölpreis würde zu einer Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Emissionen führen, ist darum illusionär, weil Kohle ein Substitut für Öl ist. Wie das Bild 5 zeigt, hat die Menschheit noch etwa 15.000 Mrd. t fossile Rohstoffe (umgerechnet in ihren potenziellen CO₂-Ausstoss) im Boden – vor allem auch Kohle. Je früher das Zeitalter des billigen Öls zu Ende geht, umso schneller wird die Weltwirtschaft in eine Kohlerenaissance katapultiert.

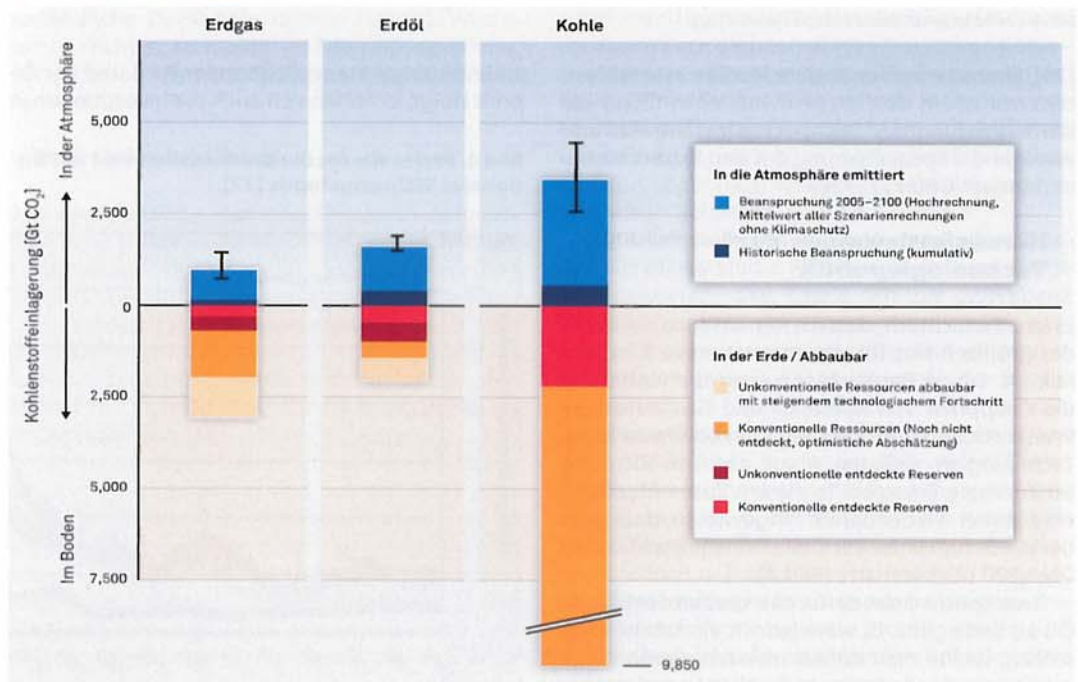
Manche Beobachter sind der Ansicht, dass die erneuerbaren Energien rasch billiger werden könnten als Kohle, Gas und Öl. Es würde sich dann einfach nicht mehr lohnen, die fossilen Energieträger zu nutzen. Zwar hat es bei den erneuerbaren Energien in den letzten Jahren deutliche Kostenreduktionen gegeben. Derzeit macht ihr Anteil am globalen Primärenergieverbrauch aber nur 12 % aus, wobei etwa die Hälfte davon auf die Nutzung traditioneller Biomasse entfällt. Die Frage ist nicht, ob die Kosten der erneuerbaren Energien sinken. Denn dieser

Effekte ist anhand der beobachteten Lernkurven nicht von der Hand zu weisen. Die Frage ist, ob sie schnell genug sinken, sodass wir bald keine fossilen Energieträger mehr nutzen werden. Die Antwort nahezu aller Szenarienrechnungen lautet: Nein! Denn die Kostenreduktionspotenziale der erneuerbaren Energien werden nicht ausreichen, um die Nutzung fossiler Energieträger so schnell einzuschränken, dass dies wie von selbst zu einem ambitionierten Klimaschutz führt. Dies liegt zum Teil auch daran, dass sinkende Kosten für erneuerbare Energien sich auch auf die Preise fossiler Ressourcen auswirken. Werden diese weniger knapp, sinkt ihr Preis, was sich wiederum in einer erhöhten Nachfrage niederschlägt.

Nun könnten die weltweiten Emissionen auch durch eine drastische Steigerung der Energieeffizienz gesenkt werden. Eine Energieeffizienzrevolution, so wird argumentiert, würde sich schon zu heutigen Preisen und Kosten rechnen. Richtig daran ist, dass sich die Energieeffizienz in den letzten 20 Jahren weltweit verbessert hat: zwischen 1990 und 2010 um durchschnittlich 1,6 % pro Jahr. Richtig ist auch, dass zahlreiche Investitionen in die Energieeffizienz bereits heute rentabel sind. Dazu gehören beispielsweise die Gebäudedämmung oder die Förderung des öffentlichen Nahverkehrs. Allerdings wurden diese Energieeffizienzsteigerungen in der Vergangenheit regelmäßig durch das Wirtschaftswachstum überkompensiert, sodass sie nur begrenzt zu einer verringerten Nachfrage nach fossilen Energieträgern beigetragen haben.

Bild 5. In die Atmosphäre emittiertes CO₂ (> 0) und noch in der Erde gebundenes CO₂ in der Form von Kohle, Öl und Gas (< 0) in Gt. Blaue Balken zeigen die Menge an Emissionen die bereits emittiert ist (dunkelblau), beziehungsweise die Menge, die von Modellszenarien ohne Klimaschutz bis zum Jahr 2100 vorhergesagt werden (hellblau). Die schwarzen Linien zeigen die Standardabweichung der Szenarien. Rote Balken zeigen Reserven (konventionell und unkonventionell), orange Balken zeigen Ressourcen (konventionell und unkonventionell).

Quelle: IPCC (2012, S. 172) [10].



Szenarienrechnungen bestätigen die Zweifel, dass sich Klimaschutz ohne Klimapolitik als unbeabsichtigte Nebenwirkung der Marktkräfte wie von selbst einstellt. Vergleichende Studien [1¹, 28, 29] kommen übereinstimmend zum Ergebnis, dass in einer Welt ohne Klimapolitik hauptsächlich fossile Energie – im wesentlichen Kohle – genutzt werden würde, um das zukünftige Wachstum zu befeuern. Die Weiterentwicklung neuer, kohlenstoffarmer Technologien ist demnach eine große Herausforderung für die internationale Technologiepolitik. Es stellt sich die Frage, welche Technologien für das Erreichen ambitionierter Klimaschutzziele entscheidend sind.

So zeigt Bild 6, dass die zusätzlichen Kosten des Klimaschutzes (ausgedrückt in Konsumverlusten bis zum Jahr 2100) steigen, wenn auf verschiedene Technologien verzichtet wird. Auf diese Weise ergibt sich eine Rangfolge der Wertigkeit verschiedener Vermeidungstechnologien. Das Klimaziel kann am kostengünstigsten erreicht werden, wenn ein möglichst breites Portfolio an Vermeidungsoptionen zur Verfügung steht. Es zeigt sich aber, dass CO₂-Abscheidung und -Speicherung (englisch Carbon Capture and Storage, CCS) und Erneuerbare Energien im Vergleich zu Biomasse oder Kernenergie ungleich wichtigere Optionen sind, um Klimaschutzziele kostengünstig zu erreichen.

Die Rolle der Biomasse ist in hohem Maße umstritten und Gegenstand einer hitzigen wissenschaftlichen Debatte [31, 32]. Zwar zeigen viele Studien, dass die Biomasse für einen ambitionierten Klimaschutz unverzichtbar ist, wenn sie emissionsneutral genutzt werden kann [26]. Wird sie unter dieser Voraussetzung mit CCS kombiniert, könnte der Atmosphäre sogar CO₂ entzogen und damit die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, das 2°C-Ziel zu erreichen. Aber gerade die Möglichkeit einer emissionsneutralen Nutzung von Bionenergie wird zur Zeit sehr heftig diskutiert. Dies liegt vor allem an den durch die Biomassenutzung entstehenden indirekten Landnutzungsemissionen und den damit verbundenen Risiken. Eine aktuelle Publikation in der Zeitschrift „Nature Climate Change“ [31] zeigt, dass diese Emissionen unter Umständen schon ausreichen, das verbleibende Kohlenstoffbudget aufzubrechen (siehe auch Abschnitt 5). Allerdings werden die Emissionen in den Modellierungsanstrengungen der relevanten Energie-Ökonomie-Modelle häufig nicht berücksichtigt.

In letzter Zeit mehren sich ebenfalls die Zweifel an der sozialen Akzeptanz der CCS-Technologien [33]. Denn die Herstellung eines geschlossenen CCS-Kreislaufs, inklusive des CO₂-Transports von der Quelle bis zu geeigneten Lagerstätten scheint zumindest in Deutschland und Europa schwieriger als gedacht. Die Autoren weisen insbesondere auf

¹ „Modellvergleichend“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich nicht nur auf ein bestimmtes Modell mit spezifischen Annahmen gestützt wird, sondern auf eine breite Auswahl an unterschiedlichen Instituten entwickelten Studien. Die gezeigten Kostenabschätzungen basieren auf Berechnungen von drei verschiedenen Modellen: IMACLIM, entwickelt von CIREN in Frankreich, REMIND, entwickelt vom Postdam-Institut für Klimafolgenforschung und WITCH, entwickelt von FEEM in Italien.

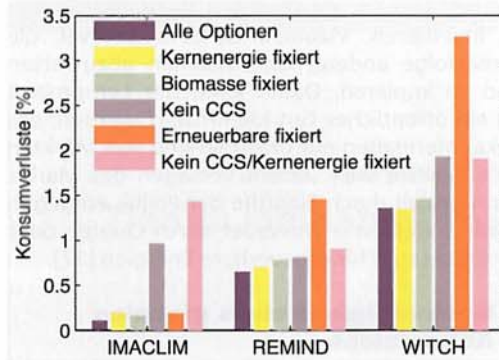


Bild 6. Zusätzliche Kosten, die durch das Einschränken bestimmter Technologieoptionen entstehen nach Berechnungen drei verschiedener Energie-Ökonomie-Modelle.

Quelle: Edenhofer et al. [30].

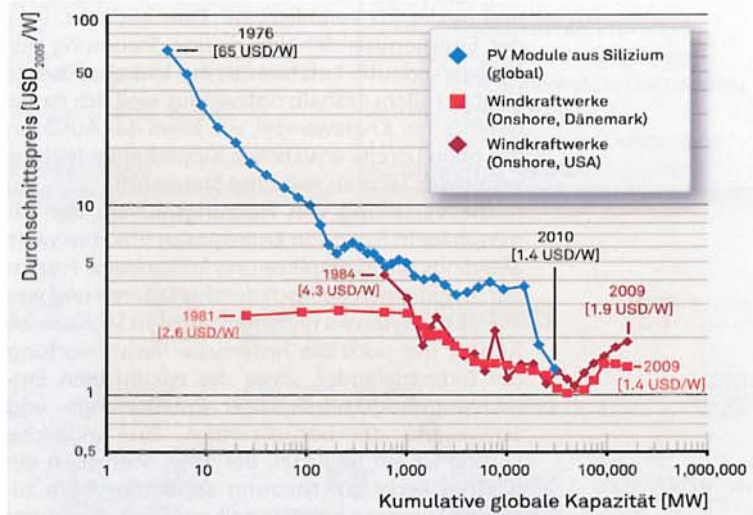
hohe Transportkosten hin, weil sie eine Lagerung des Kohlenstoffdioxids an Land für politisch nicht durchsetzbar halten. Es mag durchaus sein, dass die Rolle von CCS in Europa begrenzt sein wird. Entscheidend für den globalen Klimaschutz ist jedoch, ob CCS in den USA, China und Indien zum Einsatz kommen kann. In China und den USA sind bereits Pilotanlagen erfolgreich am Netz sowie weitere in Planung [34 und 35 für China, 36 für die USA].

Neben der Förderung von CCS müssen auch die erneuerbaren Energien unterstützt werden, da sie für die Dekarbonisierung eine entscheidende Rolle spielen werden und auch spielen können. Dies wurde eindrucksvoll durch den Sonderbericht des Weltklimarats zu erneuerbaren Energien gezeigt.

Die in dem Bild 7 illustrierten Lerneffekte können zügig durch alle am Markt operierenden Teilnehmer übernommen werden. Dadurch hat allerdings kein Unternehmen einen ausreichenden Anreiz, in den

Bild 7. Kostenentwicklung in Abhängigkeit der kumulativen globalen Gesamtkapazität ausgewählter erneuerbarer Energieträger auf einer logarithmischen Skala: Photovoltaikmodule aus Silizium (blau), Wind (onshore) in Dänemark (rotes Rechteck), Wind (onshore) in den USA (rote Raute).

Quelle: IPCC (2012, S. 15) [10].



für das Lernen notwendigen Kapazitätsausbau zu investieren. Vielmehr ist es attraktiver, die Lernerfolge anderer Unternehmen abzuwarten und zu kopieren. Damit kann der Lernprozess als ein öffentliches Gut identifiziert werden, das bekanntermaßen nur unzureichend von Märkten bereitgestellt wird. Einem Versagen des Markts kann gezielt durch Eingriffe der Politik entgegen gewirkt werden – entweder durch Quoten oder Einspeisetarife für erneuerbare Energien [37].

Notwendigkeit eines globalen Abkommens

Es ist jedoch naiv, ausschließlich auf Technologiepolitik zu setzen. Die Förderung erneuerbarer Energien und Effizienzmaßnahmen würde Energie verbilligen, sodass insgesamt mehr Energie genutzt würde. Dieses Phänomen ist in der Literatur als „Rebound-Effekt“ bekannt. Daher ist es – neben der Technologieförderung – unabdingbar, die absolute Menge der Emissionen in die Atmosphäre zu begrenzen. Damit wird sichergestellt, dass die Förderung emissionsfreier Technologien auch wirklich dem Klimaschutz zu Gute kommt.

Es gibt im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, um die Nutzung des „Deponieraums Atmosphäre“ zu steuern: Zum einen könnte man eine CO₂-Steuer erheben und das Steueraufkommen verteilen. Alternativ kann die Menge des Kohlenstoffbudgets direkt durch die Ausgabe von Emissionsrechten gesteuert werden, die zwischen den Marktteilnehmern handelbar sind. Jeder, der Kohle, Öl oder Gas verbrennen will, muss dann nicht nur den Preis dieser Brennstoffe zahlen, sondern zugleich das entsprechende Emissionsrecht erwerben. Da das Angebot durch das Kohlenstoffbudget fixiert ist, wird bei steigender Nachfrage am Emissionsmarkt der Preis der Emissionsrechte steigen. Dadurch werden Verfahren marktfähig, die keine fossilen Energieträger nutzen und nicht auf den Kauf von Emissionszertifikaten angewiesen sind.

Wir betrachten hier nur die zweite Option eines Emissionshandelssystems. Zum einen, weil der Emissionshandel im Kyoto-Protokoll festgelegt wurde und in der EU verankert ist. Zum anderen, weil der Emissionshandel eine direkte Steuerung der Mengen erlaubt. Letzteres ist aus klimapolitischer Sicht vor allem deshalb notwendig, weil sich damit gefährlicher Klimawandel, vor allem das Auslösen der oben bereits erwähnten Kippschalter, leichter vermeiden lässt als mit einer Steuer [38].

Die Verteilung von Nutzungsrechten der Atmosphäre in Form von Emissionszertifikaten wirft allerdings hochkomplexe und kontroverse Fragen auf. Es gilt einen politisch durchsetzbaren und von allen Beteiligten als fair empfundenen Schlüssel zu finden, der auch die historische Verantwortung der Industrieländer sowie die zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten der Entwicklungs- und Schwellenländer berücksichtigt. Eine mögliche Lösung ist ein Schlüssel, der allen Menschen ein gleiches Recht auf Nutzung der Atmosphäre zuspricht. Diese pro-Kopf-Verteilung würde allerdings

zu erheblichen finanziellen Transfers von Industrie in Entwicklungsländern führen. Deren politische Durchsetzbarkeit auf der einen aber auch der Nutzen für die Entwicklungsländer auf der anderen Seite kann als zweifelhaft angesehen werden. So müsste zum Beispiel sichergestellt werden, dass die durch den internationalen Emissionshandel verursachten Finanztransfers in den Entwicklungsländern nicht eine ähnlich fatale Wirkung entfalten wie Ressourceneinkünfte in der Vergangenheit. Ein Phänomen, das die Entwicklungsökonomie auch unter dem Schlagwort „Ressourcenflucht“ kennt. Daher bedürfte es entsprechender Anpassungen der Verteilungsregel von Zertifikaten oder institutionelle Mechanismen, um die verantwortungsvolle Verwaltung der Einnahmen sicherzustellen [39].

Die Festlegung eines Klimaziels hat darüberhinaus noch weitere, ebenfalls gravierende ökonomische Konsequenzen: Die Eigentums-beziehungsweise Nutzungsrechte an der Atmosphäre werden neu verteilt. In einer Welt ohne Klimaschutz konnte jeder die Atmosphäre kostenlos nutzen. Mit der verbindlichen Festlegung eines globalen klimapolitischen Ziels wird der „Deponieraum Atmosphäre“ rechtlich begrenzt und zum Eigentum der gesamten Menschheit erklärt. Diese Begrenzung hat eine Implikation, die von vielen Experten schlicht vernachlässigt wird: Die Besitztitel der Eigentümer von Kohle, Öl und Gas werden entwertet, da global ein höherer Bestand an fossilen Energieträgern im Boden liegt, als die Menschheit gemäß einer solchen Vereinbarung in der Atmosphäre noch ablagern darf. Von den noch etwa 15.000 Gt CO₂, das in Form von fossilen Brennstoffen noch in der Erde gebunden ist, dürfen nur noch 750 Gt in der Atmosphäre abgelagert werden. Das gilt zumindest, wenn das 2°C-Ziel mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht werden soll. Auch zur Einhaltung eines 3°C-Ziels könnten nur wenige hundert Gigatonnen zusätzlich in der Atmosphäre abgelagert werden. Der Rest der Bestände an Kohle, Öl und Gas müsste ungenutzt im Boden bleiben und würde somit entwertet.

Da der atmosphärische Deponieraum zu einer knappen Ressource geworden ist, deren Wert steigt, so lange fossile Energieträgern genutzt werden, können die Besitzer fossiler Ressourcen einen Großteil ihrer im Boden lagernden Bestände nicht mehr am Markt verkaufen. Damit kommt es zu einer Umverteilung von Vermögen und Einkommen zwischen den Eigentümern der fossilen Ressourcenbestände und den Eigentümern der Atmosphäre. Diese Umverteilung ist eine Konsequenz der Tatsache, dass die Atmosphäre nicht mehr kostenlos genutzt werden kann. Dieser Zusammenhang macht aber auch deutlich, warum es gegen jede ambitionierte Klimapolitik von betroffenen Interessengruppen erhebliche Widerstände geben wird. Für die Besitzer dieser Ressourcen ist es vorteilhafter, wenn es keinen Klimawandel und keine Klimapolitik gibt. Es ist also verständlich, warum die Besitzer von Kohle, Öl und Gas interessiert sein könnten, zu zeigen, dass der Klimawandel nicht vom Menschen verursacht sei, oder dass seine Folgen nicht gravierend seien.

Sinnvolle Zwischenschritte [40]

Mit der Festlegung eines globalen Kohlenstoffbudgets, also der „Deponiegröße“, ist es jedoch nicht getan. Es muss darüber hinaus festgelegt werden, wie die Nutzungsrechte dieser Deponie verteilt werden sollen. Angesichts der globalen Dimension und Komplexität des Problems ist allerdings nicht zu erwarten, dass dies schnell und auf einmal passieren wird. Daher sind Zwischenschritte erstrebenswert.

Auf internationaler Ebene wird es darum gehen, den völkerrechtlichen Rahmen abzustecken, in dem die einzelnen Nationalstaaten Verpflichtungen übernehmen. Die Grundsätze der Lastenverteilung und die Unterstützung von Entwicklungsländern werden auf dieser Ebene ebenso geklärt werden müssen wie die Einführung von Sanktionen, die einen Schutz gegen Trittbrettfahrende Nationalstaaten entfalten könnten. Einer der ermutigendsten Fortschritte der letzten Verhandlungsrunden im Kontext der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change) war die Zusage der Industriestaaten, bis zum Jahr 2020 eine Summe von jährlich 100 Mrd. US-\$ für den Klimaschutz in Entwicklungs- und Schwellenländern zu mobilisieren. Damit könnten wichtige erste Schritte zur Transformation der Energiesysteme der Empfängerländer unternommen werden. Hierbei gilt das Augenmerk in erster Linie technologisch-politischen Instrumenten: Subventionen für erneuerbare Energien, Kohlenstoffabscheidung und -speicherung sowie Demonstrationsprojekten, die an die lokalen Gegebenheiten angepasst sind. Ein weiterer zentraler Punkt ist der Waldschutz. Dieser bietet nicht nur eine vergleichsweise kostengünstige Vermeidungsoption. Vielmehr offeriert er Zusatznutzen, die über die Klimapolitik hinaus gehen – beispielsweise die Erhaltung der Artenvielfalt und der Lebensgrundlage lokaler Gemeinschaften. Die Förderung so genannter „Nationally Appropriate Mitigation Actions“ (NAMAs) durch den „Green Climate Fund“ können hier hilfreich sein, um Emissionsminderungen zu erzielen, die im Einklang mit nationalen Entwicklungszielen stehen. Damit dieser wichtige Schritt in Richtung effektiven Klimaschutzes unternommen werden kann, müssen die zugesicherten Finanzmittel natürlich auch bereitgestellt werden. Außerdem bedarf es geeigneter Anreizsysteme, um ihre effiziente Verwendung zu gewährleisten.

Auf regionaler Ebene könnten neu entstehende Emissionshandelssysteme so ausgestaltet werden, dass sie zu einem späteren Zeitpunkt miteinander zu verknüpfen sind. Das europäische Emissionshandelssystem ist zu verbessern, indem alle Sektoren einbezogen werden – also auch der Transport- sowie der Gebäudebereich. Angesichts der geplanten Emissionshandelssysteme in Kalifornien, China und anderen OECD-Staaten wie Australien und Südkorea ist die Verknüpfung solcher regionaler Systeme eine vielversprechende Option zur Minderung von Klimaschutzkosten. Mit

der ICAP-Initiative („International Carbon Action Partnership“) wurde auf Anregung Deutschlands und Kaliforniens eine Plattform gegründet, die solche Verknüpfungen durch einen Dialog auf operativer Ebene vorbereiten soll.

Auf nationaler Ebene können Subventionen für fossile Energieträger – weltweit immerhin rund 400 Mrd. US-\$ im Jahr 2010 [41] – abgebaut und zur Förderung lernender erneuerbarer Energien verwendet werden. Laut Berechnungen der OECD könnte ein Abbau dieser Subventionen bis zum Jahr 2050 zu einer Senkung der weltweiten Treibhausgasemissionen von bis zu 10 % führen. Deutschland kann mit einer erfolgreichen Energiewende zeigen, dass sich Wohlstand und Emissionswachstum entkoppeln lassen.

Die lokale Ebene wurde in der klimapolitischen Debatte bisher sträflich vernachlässigt. Allein durch die Nutzung der bereits bestehenden Energie- und Transportinfrastrukturen werden bei normaler Nutzungsdauer in den nächsten 50 Jahren beinahe 500 Mrd. t CO₂ emittiert werden. Gerade in Asien und Afrika wird in den nächsten Jahren zusätzliche Infrastruktur im großen Maßstab aufgebaut werden. Hier wird es darauf ankommen, diese so kohlenstoffarm wie möglich zu gestalten, da sie in der Regel den Spielraum für Emissionsenkungen für mehrere Dekaden festlegt. Die Städte sind hier die entscheidenden Spieler, da die Emissionen durch öffentlichen Nahverkehr, Stadtplanung und Umbau der Gebäudeinfrastruktur drastisch gesenkt werden können. Während bei Diskussionen rund um den Klimaschutz meist die Reduktion von CO₂-Emissionen im Mittelpunkt steht, spielen Aerosole – also winzige Partikel in Abgasen – auf lokaler Ebene ebenfalls eine große Rolle. Die Bekämpfung lokaler Luftverschmutzung kann hier eine wichtige Dynamik für die Klimapolitik entfalten. Neueste Schätzungen gehen davon aus, dass Maßnahmen zur Reduktion des Rußpartikelaustoßes den zukünftigen Anstieg der globalen Mitteltemperatur deutlich verringern könnten [42].

Erste Schritte auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene können die Verhandlungen auf internationaler Ebene erleichtern, weil sie die Kosten der Emissionsvermeidung senken. Aber auch das Umgekehrte gilt: Die Klimapolitik auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene kann nur erfolgreich sein, wenn es am Ende zu einem globalen Abkommen kommt. Denn es bedarf eines ordnungspolitischen Rahmens, in dem die Nutzung der Atmosphäre einen Preis bekommt und Nutzungsrechte fair verteilt und gehandelt werden können. In diesem ordnungspolitischen Rahmen kann Effizienzsteigerung und Technologiepolitik eine sinnvolle Rolle spielen: Energieeffizienz und kohlenstofffreie Energien führen dann tatsächlich zur Verminderung von Emissionen, wenn die Nutzung des Deponieraums begrenzt wird.

Das Wirtschaftsmodell der Zukunft

Ein globaler Klimavertrag ist nötig, um Wirtschaftswachstum und Klimapolitik zu versöhnen. Dies ist

auch dringend notwendig, wenn man bedenkt, dass gegenwärtig weltweit etwa 1,5 Mrd. Menschen noch nicht einmal Zugang zu Elektrizität haben. Circa 2,7 Mrd. Menschen sind gezwungen, ihr Leben ohne saubere Energiequellen für Heizen und Kochen zu fristen. Selbst wenn sich die industrialisierten Gesellschaften vom Wachstum als wirtschaftspolitischem Leitbild verabschieden, wäre ein Konsumverzicht, der den Entwicklungs- und Schwellenländern abgefordert würde, ethisch nicht vertretbar.

Es gibt viele Befürchtungen, dass die Schaffung eines ordnungspolitischen Rahmens zu lange dauern und somit das 2°C-Ziel verfehlt werden könnte. Diese Befürchtung ist zwar berechtigt, jedoch sind selbst ambitionierte Klimaschutzziele mit einer Verzögerung bis 2020 noch möglich – wenn auch zu deutlich höheren Kosten [43]. Der entscheidende Verdienst der letzten Verhandlungsrunde in Durban liegt darin, dass die Chancen für einen internationalen Klimavertrag stabilisiert wurden. Daher beziehen Investoren bereits heute zukünftige CO₂-Preise zumindest als Möglichkeit in ihre Investitionsrechnung mit ein.

Die Renaissance der Kohle stellt die internationale Klimapolitik vor bisher nicht gekannte Herausforderungen. Das Ausmaß dieser Renaissance und die damit verbundenen Herausforderungen wurden bislang unterschätzt. Die Nutzung fossiler Energieträger, Wettbewerb und private Eigentumsrechte waren die Grundpfeiler des Wohlstands im 20. Jahrhundert. Das 21. Jahrhundert wird nicht primär durch die Knappheit fossiler Energieträger geprägt sein, sondern vor allem durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre. Die Atmosphäre ist jedoch ein Gemeingut der gesamten Menschheit. Durch internationale Kooperation wird sich die Menschheit darüber verständigen müssen, in welchem Ausmaß sie diesen knappen Deponieraum noch nutzen kann und will. Auch angesichts dieser Knappheit kann es im 21. Jahrhundert ausreichend Wirtschaftswachstum geben, wenn ausreichend kohlenstoffarme Technologien zur Verfügung stehen. Das Wohlstandsmodell des 21. Jahrhunderts wird aber nicht mehr durch die fossilen Energieträger, Wettbewerb und Privateigentum geprägt sein. Der Wohlstand des 21. Jahrhunderts kann nur durch kohlenstoffarme Techniken, Kooperation und eine treuhändlerische Bewirtschaftung der globalen Gemeingüter gesichert werden.

Quellenverzeichnis

[1] S. Solomon e.a. (Hrsg.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working

Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge and New York.

[2] Die „Charles G. Koch Charitable Foundation“ finanzierte 24% der Studie, siehe auch <http://berkeleyearth.org/pdf/muller-testimony-31-march-2011.pdf>

[3] Berkeley Earth Surface Temperature Study (2012). Die Ergebnisse sind auf der Seite <http://berkeleyearth.org/> im Internet abrufbar.

[4] Martin Weitzman, On Modelling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change. The Review of Economics and Statistics. February 2009, 91(1): 1–19.

[5] Dieses Ergebnis zeigt sich gegenüber verschiedenen Kritikpunkten sehr robust, wirft allerdings interessante Fragen auf, wie die Gesellschaft mit Katastrophen umgehen will. Für eine weiterführende Diskussion siehe [8].

[6] T.M. Lenton, e.a.: Tipping elements in the Earth’s climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. 105, 1786-1793.

[7] O. Edenhofer; H. Lotze-Campen; J. Wallacher; M. Rieder (Hrsg) (2010a): Global, aber gerecht: Klimawandel bekämpfen, Entwicklung ermöglichen. Beck 2010.

[8] Millner, A. (2011): On welfare frameworks and catastrophic climate risks. Berkely University Working Paper. Im Internet unter <http://are.berkeley.edu/documents/seminar/catastrophes.pdf> (Abgerufen im Februar 2012).

[9] Edenhofer, O.; G. Luderer, C.; Flachsland, H.M.; Füßel, A.; Popp, B.; Knopf, G.; Feulner, H.; Held (2008): A global contract on climate change. Hintergrundpapier für die Konferenz „A Global Contract based on climate justice: The need for a new approach concerning international relations“ in Brüssel, 11. November 2008. Im Internet: <http://www.pi-potsdam.de/members/flachs/publikationen-2/global-contract-full-text> (Abgerufen im Februar 2012).

[10] IPCC (2012): IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp.

[11] In sehr hoch entwickelten Volkswirtschaften liegt dieser Wert sogar teilweise deutlich über 100 GJ pro Kopf, in Entwicklungsländern in der Regel nicht über 20 GJ pro Kopf. Steckel, JC; RJ Brecha, J; Strefler, M.; Jakob, G.; Luderer (2012): Development without



- energy? On the challenge of sustainable development in the context of climate change mitigation. Unter Begutachtung bei Ecological Economics.
- [12] Toman, MA and Jemelkova, B. (2003): Energy and Economic Development: An assessment of the state of the knowledge. *The Energy Journal*, 24 (4), pp. 93 – 112
- [13] Schurr, SH (1984): Energy use, technological change and productive efficiency: An economic-historical interpretation. *Annual Review of Energy*, 9, pp. 409 – 425
- [14] Messner, D. (2011): Africa - a continent not only of crisis but of opportunity, too. Bonn: Deutsches Institut für Entwicklungspolitik / German Development Institute (The current column, August 1, 2011).
- [15] Als absolute Armutsgrenze wird hier der Teil der Bevölkerung definiert, der weniger als 1,25 US\$ (in PPP) pro Tag zur Verfügung hat.
- [16] Diese Aussagen basieren auf Daten der Weltbank, im Internet unter <http://data.worldbank.org> (Abgerufen im Januar 2012).
- [17] Nach Steckel et al. (2011) [13], mit Daten der Internationalen Energieagentur (IEA) [20].
- [18] Steckel, JC; M. Jakob, R.; Marschinski, G.; Luderer (2011): From carbonization to decarbonization? Past trends and future scenarios for China's CO₂ emissions. *Energy Policy*, 39 (6), pp. 3443 – 3455.
- [19] Diese Form der Dekomposition ist als Kaya Dekomposition bekannt, nach [21].
- [20] IEA (2011): *World Energy Balances 2011*. Paris: IEA Data Services.
- [21] Kaya, Y. (1990): Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios. Paper presented to the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris. (mimeo).
- [22] Davis, S.J. and Caldeira, K. (2010): Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *PNAS*, 107 (12), pp. 5687-5692.
- [23] Peters, GP, JC Minx, CL Weber, O. Edenhofer (2011): Growth in emission transfers via international trade from 1990 – 2008. *PNAS*, 108 (21), pp. 8903-8908.
- [24] Jakob, M. and R. Marschinski (2012): Consumption-based accounting of CO₂ emissions offers only limited economic insights: A trade-theory perspective. Working paper, Potsdam: Potsdam-Institute for Climate Impact Research (PIK).
- [25] Liao, H., Y. Fan, YM Wei (2007): What induced China's energy intensity to fluctuate: 1997–2006? *Energy Policy*, 35, pp. 4640 – 4649.
- [26] Ma, C. and DI Stern (2008): China's changing energy intensity trend. A decomposition analysis. *Energy Economics*, 30 (3), pp. 1037–1053.
- [27] Internationaler Währungsfond (2011): *World Economic Outlook*. Grafik 1.22, Daten. Abrufbar im
- [28] Edenhofer, O; Knopf, B; Barker, T; Baumstark, L; Bellevrat, E; Chateau, B; Criqui, P; Isaac, M; Kitous, A; Kypreos, S; Leimbach, M; Lessmann, K; Magné, B; Scricciu, S; Turton, H; van Vuuren DP (2010). The economics of low stabilization: model comparison of mitigation strategies and costs. *Energy Journal*, 31(Special Issue 1), pp. 11-48
- [29] Luderer, G.; Bosetti, V.; Jakob, M.; Leimbach, M.; Steckel, J.; Waisman, H., Edenhofer, O. (2012): On the Economics of Decarbonization – Results and Insights from the RECIPE Model Intercomparison. *Climatic Change*, in press, doi: 10.1007/s10584-011-0105-x.
- [30] Edenhofer, O.; Carraro, C.; Hourcade, J.-C.; Neuhoff, K.; Luderer, G.; Flachsland, C.; Jakob, M.; Popp, A.; Steckel, J.; Strohsehein, J.; Bauer, N.; Brunner, S.; Leimbach, M.; Lotze-Campen, H.; Bosetti, V.; de Cian, E.; Tavoni, M.; Sassi, O.; Waisman, H.; Crassous-Doerfler, R.; Monjon, S.; Dröge, S.; van Essen, H.; del Rio, P.; Türk, A. (2009): RECIPE – The Economics of Decarbonization. Synthesis Report. Im Internet unter <http://www.pik-potsdam.de/research/sustainable-solutions/research/ClimatePolicies/recipe-group-space/working-papers/recipe-synthesis-report/>.
- [31] Creutzig, F., Popp, A.; Plevin, R.; Luderer, G.; Minx, J.; Edenhofer, O. (2012): Reconciling top-down and bottom-up modeling on future bioenergy deployment. *Nature Climate Change*, in press, doi: 10.1038/nclimate1416.
- [32] Creutzig, F.; von Stechow, C.; Klein, D.; Hunsberger, C.; Bauer N., Popp, A., Edenhofer, O. (2012): Can bioenergy assessments deliver?. Zur Veröffentlichung angenommen in *Economics of Energy and Environmental Policy (EEEP)*.
- [33] Von Hirschhausen, C., Herold, J.; Oei, P.Y.; Haftendorn, C. (2012): CCTS-Technologie ein Fehlschlag – Umdenken in der Energiewende notwendig. In: DIW Wochenberichte Nr. 6 2012, pp. 3 – 9.
- [34] Seligsohn, D., Yue, L.; Forbes, S.; Zhang, D.; West, L. (2010): CCS in China: Toward an environmental, health and safety regulation framework. *World Resource Institute Issue Brief*. Im Internet: http://pdf.wri.org/ccs_in_china.pdf (Abgerufen im Februar 2012).
- [35] Tollefson, J. (2011): Low cost carbon-capture project sparks interest. *Nature*, 469, pp. 276 – 277.
- [36] NMA (2012): The National Mining Association: Status of CCS development. Im Internet: <http://www.nma.org/ccs/ccsprojects.asp> (Abgerufen im Februar 2012).
- [37] Kalkuhl, M.; O. Edenhofer; K. Lessmann (2012): „Learning or Lock-in: Optimal Technology Policies to Support Mitigation“. *Resource and Energy Economics*, 34(1), 1-23.
- [38] Hepburn, C. (2006): Regulation by prices, quantities, or both; a review of instrument choice. *Oxford Review of Economic Policy*, 22 (2), pp. 226 – 247.
- [39] Jakob, M., JC Steckel, C. Flachsland, L. Baumstark (2012): Climate Finance for Developing Countries: Blessing or Curse? Working Paper.
- [40] Teile dieses Abschnitts basieren auf dem Artikel „Die Illusion des grünen Wachstums“ von Ottmar Edenhofer und Michael Jakob, erschienen in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung am 02.03.2012.
- [41] Internationale Energieagentur (2011): *World Energy Outlook (WEO) 2011*. Paris: IEA.
- [42] Kopp, RE und Mauzerall, DL (2010): Assessing the climatic benefits of black carbon mitigation. *PNAS*, 107 (26), pp. 11703-11708.
- [43] Jakob, M.; Luderer, G.; Steckel, JC; Tavoni, M.; Monjon, S. (2012): Time to act now? Assessing the costs of delaying climate measures and benefits of early action. *Climatic change*, in press, doi: 10.1007/s10584-011-0128-3.