

KIEL WORKING PAPER

**Schätzungen des
verbleibenden CO₂-
Budgets täuschen
über die
Herausforderungen in
der Klimapolitik
hinweg**



No. 2116 November 2018

Wilfried Rickels, Christine Merk, Johannes Honneth, Jörg Schwinger, Martin F. Quaas, Andreas Oeschl

SCHÄTZUNGEN DES VERBLEIBENDEN CO₂- BUDGETS TÄUSCHEN ÜBER DIE HERAUSFORDERUNGEN IN DER KLIMAPOLITIK HINWEG

*Wilfried Rickels, Christine Merk, Johannes Honneth, Jörg Schwinger,
Martin F. Quaas, Andreas Oschlies*

Eine rasche Reduktion der Treibhausgasemissionen ist essentiell wenn ambitionierter Klimaschutz erreicht werden soll. Bei der Abschätzung der dafür notwendigen Anstrengungen und der Bewertung des zukünftigen Beitrags von Technologien die es erlauben der Atmosphäre CO₂ zu entziehen (negative Emissionstechnologien, NETs) gehen die Meinungen und Interpretationen über den aktuellen Sonderbericht des Weltklimarats stark auseinander. Interpretationen, die sich auf eher große verbleibende CO₂-Budgets beziehen und damit gleichzeitig die Rolle von NETs für die Erreichung des Temperaturziels herunterspielen, führen nicht zu verantwortungsvollen oder realistischen Einschätzungen der zukünftigen (Forschungs-)Herausforderung: Wir müssen bereits jetzt die Grenzen und Auswirkungen der verschiedenen NETs und ihre Wechselwirkungen verstehen, wenn die international angestrebten Minderungspfade realistisch sein sollen. Eine frühzeitige Festlegung auf bestimmte NETs sollte vermieden werden. Sobald die sich als effizient erwiesenen Technologien ausgereift genug sind, sollte der Umfang ihres Einsatzes durch die Einbeziehung in CO₂-Emissionshandelssysteme oder (freiwillige) CO₂-Kompensationsmärkte bestimmt werden.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Pariser Klimavertrag, CO₂-Budgets, Negative Emissionstechnologien, Technologieentwicklung

JEL Klassifizierung: O32, Q54

Wilfried Rickels

Kiel Institute for the World Economy
Kiellinie 66
24105 Kiel, Deutschland

Email:

wilfried.rickels@ifw-kiel.de

Christine Merk

Kiel Institute for the World Economy
Kiellinie 66
24105 Kiel, Deutschland

Johannes Honneth

Institut für Weltwirtschaft
Kiellinie 66
24105 Kiel, Deutschland

Jörg Schwinger

NORCE, Norwegisches
Forschungszentrum (Bjerknes Centre
for Climate Research)
Jahnebakken 5
5007 Bergen, Norwegen

Martin F. Quaas

Deutsches Zentrum für integrative
Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-
Jena-Leipzig
Deutscher Platz 5e
04103 Leipzig, Deutschland

Andreas Oschlies

GEOMAR Helmholtz-Zentrum für
Ozeanforschung Kiel
Düsternbrooker Weg 120
24105 Kiel, Deutschland

The responsibility for the contents of this publication rests with the author, not the Institute. Since working papers are of a preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular issue about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments should be sent directly to the author.

Schätzungen des verbleibenden CO₂-Budgets täuschen über die Herausforderungen in der Klimapolitik hinweg

Wilfried Rickels^{a,*}, Christine Merk^a, Johannes Honneth^a, Jörg Schwinger^b, Martin F. Quaas^c, Andreas Oschlies^d

^a Institut für Weltwirtschaft, 24105 Kiel, Deutschland.

^b NORCE, Norwegisches Forschungszentrum (Bjerknes Centre for Climate Research), 5007 Bergen, Norwegen.

^c Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, 04103 Leipzig, Deutschland.

^d GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, 24105 Kiel, Deutschland.

*Kontakt: wilfried.rickels@ifw-kiel.de

Zusammenfassung: Eine rasche Reduktion der Treibhausgasemissionen ist essentiell wenn ambitionierter Klimaschutz erreicht werden soll. Bei der Abschätzung der dafür notwendigen Anstrengungen und der Bewertung des zukünftigen Beitrags von Technologien die es erlauben der Atmosphäre CO₂ zu entziehen (negative Emissionstechnologien, NETs) gehen die Meinungen und Interpretationen über den aktuellen Sonderbericht des Weltklimarats stark auseinander. Interpretationen, die sich auf eher große verbleibende CO₂-Budgets beziehen und damit gleichzeitig die Rolle von NETs für die Erreichung des Temperaturziels herunterspielen, führen nicht zu verantwortungsvollen oder realistischen Einschätzungen der zukünftigen (Forschungs-)Herausforderung: Wir müssen bereits jetzt die Grenzen und Auswirkungen der verschiedenen NETs und ihre Wechselwirkungen verstehen, wenn die international angestrebten Minderungspfade realistisch sein sollen. Eine frühzeitige Festlegung auf bestimmte NETs sollte vermieden werden. Sobald die sich als effizient erwiesenen Technologien ausgereift genug sind, sollte der Umfang ihres Einsatzes durch die Einbeziehung in CO₂-Emissionshandelssysteme oder (freiwillige) CO₂-Kompensationsmärkte bestimmt werden.

JEL-Klassifikation: Q54, O32

Schlüsselwörter: Klimawandel, Pariser Klimavertrag, CO₂-Budgets, Negative Emissionstechnologien, Technologieentwicklung

1 Wieviel CO₂ können wir noch in die Atmosphäre emittieren?

Das verbleibende CO₂-Budget gibt an wie viel CO₂ kumulativ noch emittiert werden kann ohne dass eine definierte Obergrenze für den global durchschnittlichen Temperaturanstieg überschritten wird. Die Berechnung des CO₂-Budgets basiert auf der nahezu linearen Beziehung zwischen kumulativen CO₂ Emissionen und Temperaturanstieg (Allen et al. 2009). Insbesondere seit dem Pariser Klimaschutzübereinkommen, dessen Ziel es ist den langfristigen menschengemachten Temperaturanstieg auf deutlich unter 2°C und idealerweise auf 1.5°C zu begrenzen (Klimarahmenkonvention 2015), kommt dem CO₂-Budget die wichtige Bedeutung zu die Herausforderungen für den zukünftigen Klimaschutz in einer Kennzahl zusammenzufassen.

In der kürzlich veröffentlichten Schätzung, hat der Weltklimarat (IPCC) im Rahmen seines Sonderbericht zur möglichen Begrenzung des anthropogenen Klimawandels auf 1,5°C (SR15), das verbleibende CO₂-Budget um rund 300 Gigatonnen (Gt) gegenüber seiner Schätzung im Fünften Sachstandsbericht angehoben (IPCC 2018). Diese auf neue Erkenntnisse und Messungen basierende Ausweitung sind erstmal gute Neuigkeiten, erweitert sie doch den Spielraum zur Einhaltung des Temperaturzieles. Gemessen an der ursprünglichen Schätzung des verbleibenden CO₂-Budgets im Fünften Sachstandsbericht, wäre das Budget bereits heute nahezu verbraucht und es wäre daher physikalisch nicht mehr möglich das Temperaturziel ohne den Einsatz negativer Emissionstechnologien (NETs) zu erreichen. Mit Hilfe dieser Technologien wird durch biologische, chemische oder physikalische Prozesse atmosphärisches CO₂ vom Ozean oder der terrestrischen Biosphäre aufgenommen beziehungsweise wird das CO₂ direkt geologisch gespeichert oder als biologischer/synthetischer Kraftstoff dem Energiekreislauf wieder zugeführt (Rickels et al. 2011). Trotz der Ausweitung des verbleibenden CO₂-Budgets werden NETs ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Klimapolitiken sein, da selbst bei einem sehr ambitionierten (sozioökonomischen) Umbau unseres Energie-, Industrie-, Transport- und Landwirtschaftssektor auf CO₂-freie, -neutrale und -arme Technologien sowie einer Anpassung unseres Lebensstil das CO₂-Budget zu gering ist (van Vuuren et al. 2018). Allerdings sind mit den NETs noch zahlreiche Unsicherheiten verbunden und entsprechend empfiehlt der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung (WGBU) (2018) die Treibhausgasemissionen so schnell wie möglich zu reduzieren um die Notwendigkeit des zukünftigen Einsatzes dieser spekulativen Technologien zu minimieren. Nicht außer Acht lassen sollte man allerdings in diesem Kontext, dass es sich bei der CO₂-Budgetschätzung aus der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger lediglich um einen möglichen Wert aus einer großen Bandbreite von Schätzungen handelt.

Die große Bandbreite der Schätzungen für das verbleibende CO₂-Budget überrascht—auf den zweiten Blick. Klimaökonomien stehen bereits seit der Einführung der frühen integrierten Bewertungsmodelle durch William Nordhaus (1991, 1992) einer großen Bandbreite für die Schätzungen der sozialen Kosten von CO₂ („Social cost of carbon“) gegenüber, die (im Rahmen von Kosten-Nutzen-

Analyse) in einer große Bandbreite für das verbleibende CO₂-Budget entsprechend. Die große Bandbreite ergibt sich aus den unterschiedlichen Annahmen über Klimaschäden, den unterschiedliche Ansätze zur Modellierung der Unsicherheiten über die Schäden und die potenziellen Kippunkte im Klimasystem oder aus unterschiedlichen Parametrisierungen des sozialen Diskontrate.

Aber mit der Verabschiedung des Pariser Klimaabkommens wird aus der Kosten-Nutzen-Fragestellung mit einem endogen bestimmten Ausmaß des Klimawandels eine Kosteneffizienzfragestellung bei das Temperaturziel exogen festgelegt ist. Damit entfällt die große Unsicherheit über die Abschätzung und Bewertung zukünftiger Klimaschäden und die die Spannweite der Schätzungen sollte sich eigentlich deutlich verringern. Dies gilt insbesondere, da auch die Wahrscheinlichkeit das Temperaturziel zu überschreiten (z.B. 50 oder 66 Prozent) bereits vorgegeben wird; dadurch wird auch (teilweise) die aus der Klimasensitivität resultierende Unsicherheit aus der Schätzung herausgenommen. Die Bandbreite der derzeitig diskutierten CO₂-Budgets ist zwar kleiner als bei CO₂-Budgets, die sich aus den Schätzungen der sozialen Kosten von CO₂ ergeben würden, sind aber immer noch beträchtlich. Kriegler et al. (2018) wertet aktuelle Schätzungen aus und kommen für eine Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent 1,5°C nicht zu überschreiten auf eine Spannweite von -182 bis zu 818 Gt CO₂. In noch neueren Schätzungen wird die obere Grenze der Schätzungen sogar noch weiter angehoben. Leach et al. (2018) schätzen das Budget auf 479 bis 1239 Gt CO₂ (wiederum für eine Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent 1,5°C nicht zu überschreiten). Entsprechend ergibt sich die Schlussfolgerung, dass wir entweder unser CO₂-Budget für das 1,5°C Ziel bereits verbraucht haben oder doch noch 31 Jahre die derzeitigen jährlichen CO₂ Emissionen fortsetzen können.

Die große Bandbreite in den CO₂-Budgetschätzungen resultiert zu großen Teilen aus den unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Messung des Temperaturanstiegs, den Annahmen über die Entwicklung anderer Treibhausgasemissionen als CO₂, dem Zeithorizont für das verbleibende Budget sowie dem Ausmaß eines kurzfristigen Überschreitens des Temperaturziels. Wie sich diese Punkte im Detail technisch auswirken ist nicht Fragestellung dieses Artikels, sehr wohl aber die mit diesen Annahmen verbundenen Implikationen für die Klimapolitik.¹ Diese unterschiedlichen Einflussgrößen sind Stellschrauben mithilfe derer die Schätzungen des verbleibenden CO₂-Budgets reduziert oder erhöht und der entsprechende Bedarf an negativen CO₂-Emissionen ermittelt werden kann. Es erscheint (politisch) verlockend, ein größeres CO₂-Budget zu kommunizieren, um die Schlussfolgerung zu vermeiden, dass die ehrgeizigen Pariser Klimaziele ohne die tiefgreifende Veränderung unserer Lebensstilen sowie unangenehmen Entscheidungen in Bezug auf den Einsatz NETs nicht einhaltbar ist.

¹ Hausfather (2018a, 2018b) bietet eine exzellente Übersicht über die technischen Gründe für unterschiedliche CO₂-Budgetschätzungen und wie diese in den Sonderbericht des Weltklimarats eingegangen sind.

2 Stellschrauben für das verbleibende CO₂-Budget

Bei der Einstellung der verschiedenen Stellschrauben handelt es sich nicht nur um technische Fragen, sondern auch um die gesellschaftspolitische Frage wie die Kosten des Klimawandels regional und zeitlich verteilt werden.

2.1 Wie misst man den globalen Temperaturanstieg?

Dieser Punkt mag trivial klingen, aber im Pariser Abkommen ist nicht genau definiert, wie eine Temperaturerhöhung von 1,5°C gemessen werden soll. Wie die historische mittlere globale Temperatur und die aktuelle globale Temperatur gemessen werden hat Auswirkungen auf das Temperaturbudget. In der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger wird ein CO₂-Emissionsbudget von 570 Gt CO₂ (für eine Wahrscheinlichkeit von 66 Prozent die 1.5°C-Marke nicht zu übersteigen) genannt – das gilt wenn der Anstieg über die „Globale Durchschnittstemperatur an der Oberfläche“ ermittelt wird. Verwendet man stattdessen als Metrik die „Globale Luftdurchschnittstemperatur an der Oberfläche“ sinkt das verbleibende CO₂-Budget auf 420 GtCO₂ für dieselbe Wahrscheinlichkeit das globale Temperaturziel nicht zu übersteigen. Die Berechnungsweise der historischen, heutigen und zukünftigen (modellbasierten) globalen Durchschnittstemperatur beeinflusst die Schätzung des verbleibenden CO₂-Emissionsbudgets. Verschiedene Datensätze beinhalten zum Beispiel die arktischen Regionen nicht. Diese Regionen erwärmen sich im Vergleich zum Rest der Welt aber überproportional stark. Berücksichtigt man diese Regionen bei der Berechnung der Erwärmung, sinkt das verbleibende CO₂-Budget zwischen 30 und 160 Gt CO₂ (Hausfather 2018). Zudem verdeutlicht das einmal mehr, dass der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur mit erheblichen regionalen Unterschieden einhergeht. Seneviratne et al. (2018) schätzen zum Beispiel, dass es bei einem globalen mittleren Temperaturanstieg von 1.5°C in den Vereinigten Staaten von Amerika² und Zentralbrasilien zu einer Erwärmung von 2°C beziehungsweise 2.3°C und in der Arktis sogar von bis zu 4.2°C kommen kann.

Entsprechend erfordert effiziente Klimapolitik eine klare Definition der Messung des globalen Temperaturanstiegs und eine klare Kommunikation, dass ein globaler Grenzwert nur bedingt Rückschlüsse auf den regionalen Temperaturanstieg zulässt. Selbst wenn es gelingt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf 1.5°C zu begrenzen, müssen sich verschiedene Regionen auf höhere Temperaturen und damit stärkere Auswirkungen einstellen. Sie müssen sich also stärker an den Klimawandel anpassen als andere Regionen und haben eigentlich starke Anreize ambitionierteren Klimaschutz zu fordern.

2.2 Wie erfolgreich ist die Vermeidung zukünftiger Nicht-CO₂ Emissionen?

Eine effiziente Klimapolitik erfordert eine explizite Berücksichtigung der Emissionsvermeidung anderer Treibhausgasemissionen als CO₂ (Mosler und Requate 2009). Zukünftige Methan- und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft, der Abfallentsorgung und der Verbrennung von Biomasse, aber auch

² Ohne Inseln und Alaska.

Aerosolemissionen, die derzeit einen erheblichen Teil des treibhausgasbedingten Strahlungsantriebs kompensieren und damit kühlen, haben einen starken Einfluss auf die Höhe des verbleibenden Emissionsbudgets. Unterstellt man, dass die Nicht-CO₂ Emissionen 0,5°C statt nur 0,3°C zur zukünftigen Erwärmung beitragen, reduziert sich das verbleibende CO₂-Budgets für das 1,5°C Ziel bei einer Einhaltungswahrscheinlichkeit von 50 Prozent um etwa 500 GtCO₂ (Kriegler et al. 2018). Die Annahmen über die zukünftigen Emissionen von (kühlenden) Aerosolen haben einen ähnlichen Einfluss auf das verbleibende CO₂-Emissionsbudget (Mauritsen und Pincus 2017). Je näher wir uns einem bestimmten Temperaturziel nähern, desto größer wird der relative Einfluss von kurzlebigen Nicht-CO₂-Emissionen und entsprechend bietet eine dynamische Anpassung der Emissionsvermeidung von Nicht-CO₂-Emission und Aerosolemission Potential für eine effizientere Klimapolitik (Moslener und Requate 2009).

(Smith et al. 2014) schätzen, dass der Agrarsektor insbesondere durch Methan und Lachgasemissionen ungefähr 11 Prozent zu den globalen Treibhausgasemissionen beiträgt (ohne Emissionen aus der Landnutzungsänderung). Berücksichtigt man den prognostizierten Nahrungsmittelbedarf für eine steigende Weltbevölkerung wird deutlich welche Bedeutung diesem Sektor für ambitionierten Klimaschutz zukommt, aber gleichzeitig auch wie schwierig es wird die Nicht-CO₂-Emissionen in diesem Sektor zu reduzieren (Springmann et al. 2017). Während viele Länder in ihren national festgelegten Beiträge zum Pariser Klimaabkommen („Nationally Determined Contributions“) Minderungsmaßnahmen im Agrarsektor erwähnen, fehlen bislang sektorspezifische Ziele (OECD 2018). Es bleibt somit unklar, wie und inwieweit der Agrarsektor seine Treibhausgasemissionen reduzieren soll (Wollenberg et al. 2016). Möglicherweise handelt es sich dabei um eine bewusste Lücke, da die Politik bislang wenig Willen zeigt, nachfrageseitige Anreize zur Reduzierung des Fleisch- und Milchverbrauchs zu setzen.

2.3 Für welchen Zeitraum wird das CO₂-Budget berechnet?

Die Pariser Klimaziele sind mit Blick auf das Jahr 2100 formuliert, das verbleibende CO₂-Emissionsbudget in der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger wird aber als die Summe der CO₂-Emissionen bis zu dem Zeitpunkt an dem die CO₂-Emissionen netto gleich null werden errechnet. Je nachdem wie in den Szenarien die Einhaltung des Temperaturgrenzwertes definiert ist, bezieht sich das CO₂-Budget auf einen Zeitraum bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts kompensieren aber alle integrierten Bewertungsmodelle, die im Sonderreport des Weltklimarats vertreten sind, die fortlaufende Erwärmung durch Nicht-CO₂-Emissionen durch den Einsatz negativer Emissionstechnologien. Wenn diese Technologien aber nicht eingesetzt werden können oder sollen, würde sich das Netto-CO₂-Budget für die Einhaltung des 1,5°C-Zieles bis zum Ende des Jahrhunderts weiter verringern, auf einen Wert der möglicherweise noch eine physikalische Einhaltung des Temperaturziels erlauben würde, aber nicht mehr sozioökonomisch realisierbar wäre (van Vuuren et al. 2018). Konzentriert man sich in der Kommunikation auf das verbleibende CO₂-Budget bis zum Zeitpunkt wenn die

CO₂-Emissionen netto gleich null sind, verschleiert man die Herausforderungen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, nämlich dass eine erhebliche Menge an CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden muss, um den Temperaturanstieg auf 1.5°C zu begrenzen.

2.4 Darf die Temperatur den Grenzwert temporär überschreiten?

411 Szenarien aus integrierten Bewertungsmodellen wurden bei den Berechnungen der CO₂-Budgets für den Sonderbericht des Weltklimarats berücksichtigt. In 90 dieser Szenarien wird der Temperaturanstieg zum Ende des Jahrhunderts auf 1.5°C begrenzt, allerdings kommt es dabei in nur 5 Szenarien nicht zu einer temporären Überschreitung des Grenzwertes.³ In allen anderen Szenarien kommt es zeitweise zu globaler Erwärmung über 1.5°C und damit zu noch stärkeren regionalen Veränderungen (vergleiche Abschnitt 2.1). Das Ausmaß der Überschreitung hat keinen direkten Einfluss auf das Netto-CO₂-Budget, weil die langsamere Reduktion der Emission in der ersten Hälfte des Jahrhunderts durch eine größere Menge negativer Emissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts kompensiert werden würde.⁴

Emissionsszenarien bei denen der Temperaturgrenzwert temporär überschritten wird, erlauben zwar ein schnelleres Lernen über die Klimasensitivität (und damit eine theoretisch effizientere Klimapolitik in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts) (Kelly und Kolstad 1999), beinhalten aber das Risiko weniger reversible Erdsystemprozesse anzustoßen, wie zum Beispiel das Auftauen von Permafrostböden und der damit verbundenen Freisetzung von CO₂ und Methan (Boucher et al. 2012). Werden solche langsam revidierbare oder irreversible Prozesse angestoßen, würde es eine erhebliche zusätzliche Menge an negativen Emissionen erfordern, um die Temperatur innerhalb dieses Jahrhunderts wieder absenken zu können (vergleiche (Schoor et al. 2015) für den Fall der CO₂-Freisetzung aus Permafrostböden). Ob eine solche Ausweitung der negativen Emissionen überhaupt (in kurzer Zeit) möglich, geschweige denn wirtschaftlich wäre, ist unklar. Auch ist unklar, ob eine Abkühlung nach einer Überschreitung des Temperaturgrenzwerts tatsächlich erstrebenswert wäre. Es gilt als wahrscheinlich, dass jede Temperaturänderung—unabhängig von der Richtung—sowohl Ökosysteme als auch Gesellschaften zusätzlich belastet. Das gilt insbesondere, weil eine temporäre Überschreitung des Temperaturgrenzwerts eine effiziente Anpassungsstrategie an den Klimawandel erschwert. Wenn man also das Risiko einer zeitweisen Überschreitung eines Temperaturzieles eingehen will oder muss, sind zusätzliche Grenzwerte für das Ausmaß und die Dauer der Überschreitung erforderlich (Geden und Löscher 2017).

³ Insgesamt fallen 9 Emissionsszenarien in die Kategorie „Einhaltung von 1.5°C ohne Überschreitung“, allerdings wurden 4 Emissionsszenarien nicht berücksichtigt, da bei ihnen die Kyoto-Treibhausgase außerhalb einer vordefinierten Spannweite lagen.

⁴ Diese Beziehung gilt allerdings nicht exakt da negative CO₂ Emissionen das CO₂-Budget nicht linear sondern aufgrund von Rückkopplungsprozessen im Kohlenstoffkreislauf unterproportional vergrößern (Rickels et al. 2018).

3 Die Rolle negativer CO₂-Emissionen für die internationale Klimapolitik

Empfehlungen wie die des WBGU (2018), lassen den Schluss zu, dass NETs eher Teil des Problems als Teil der Lösung sind. Der WBGU warnt vor jedem Optimismus über ihren Einsatz. Seine Bedenken bezüglich negativer Emissionstechnologien sind (teilweise) berechtigt, denn für zahlreiche Technologien gibt es noch erhebliche Unsicherheiten über ihr tatsächliches Potential und mögliche Nebenwirkungen. Darüber hinaus wird befürchtet, dass ihr prospektiver Einsatz dazu führt, dass konventionelle Emissionsvermeidung aufgeschoben oder unterlassen wird. Acemoglu und Rafey (2018) argumentieren, dass durch negative Emission (im Modellrahmen einer globalen Entscheidungsfindung) die CO₂-Steuer sinkt, wodurch der Anreiz in saubere Technologien zu investieren geringer wird und somit der Übergang in ein CO₂-freies Energiesystem verlangsamt wird. Ihre Schlussfolgerung basiert aber auf der Annahme, dass die politischen Entscheidungsträger eine CO₂-Steuer festlegen, die oberhalb der Pigou-Steuer liegt, mit dem Ziel so die positiven Forschungsexternalitäten zu internalisieren. Unter der Annahme, dass es durch „Learning-by-doing“ zu nicht kompensierten Übertragungseffekten („Spill-over-Effekten“) auf andere Marktteilnehmer kommt, wird das öffentliche Gut „neue Erkenntnis“ (durch Forschung und Entwicklung) zu wenig bereitgestellt (Jaffe et al. 2005). Die Anhebung der CO₂-Steuer ist aber kein geeignetes Instrument um technologische Übertragungseffekte zu internalisieren. Aufgabe der CO₂-Steuer ist es durch Emissionen verursachte externe Kosten zu internalisieren—entsprechend ist sie technologieneutral. Fischer und Newell (2008) sowie Acemoglu et al. (2012) (in einer früheren Arbeit) zeigen, dass in einer optimalen Klimapolitik CO₂-Besteuerung durch Forschungsförderung für alternative Technologien komplementiert werden muss. Ohne Frage existieren bei der Verwendung fossiler Energiequellen weitere externe Effekte, wie zum Beispiel der lokale Beitrag zu Luftschadstoffen, die entsprechend zu berücksichtigen und internalisieren sind. Im Hinblick auf den Klimawandel ist es aber schwer nachvollziehbar, warum die CO₂-Steuer oberhalb der optimalen Steuer angesetzt werden sollte. Entsprechend kommen Quaas et al. (2017) zu dem Ergebnis, dass weder der Anstieg der Wahrscheinlichkeit eines Einsatzes einer Technologie (Dammbbruch-Argument, „Slippery-slope argument“) noch die Substitution konventioneller Emissionsvermeidung („Moral-Hazard argument“) als Argumente gegen ergebnisoffene Forschung zur Abschätzung des Potentials der Technologien ausreichen.

Die Notwendigkeit NETs zu berücksichtigen und zu erforschen, wird in der Arbeit von van Vuuren et al. (2018) besonders deutlich. Die Autoren kombinieren die folgenden anspruchsvollen Annahmen, um eine absolute (sozio-ökonomische) Untergrenze für den Bedarf von NETs zu bestimmen: a) ab 2020 gibt es in allen Regionen und Sektoren der Weltwirtschaft eine einheitliche CO₂-Steuer, (b) eine sehr schnelle Steigerung der Energie- und Materialeffizienz, der Elektrifizierungsraten und des Einsatzes erneuerbarer Energien in Energie, Industrie und Verkehr weltweit, (c) die Menschen entscheiden sich für einen CO₂-armen Lebensstil (bei Heizen, Reisen, Einsatz von Haushaltsgeräten, etc.) und eine fleischarm Ernährung, die ab 2050 vollständig durch kultiviertes Fleisch gedeckt wird, sodass auch die nicht-CO₂

Emissionen im Agrarsektor stark sinken und (d) die Bevölkerung wächst nur vergleichsweise langsam (8,4 Milliarden Menschen im Jahr 2050 und 6,9 Milliarden Menschen im Jahr 2100, wie im „Shared Socioeconomic Pathway“ (SSP) 1) unterstellt). Unter diesen Annahmen schätzen die Autoren, dass für die Einhaltung des 1,5°C-Ziels bis zum Ende des Jahrhunderts etwa 400 Gt CO₂ aus der Atmosphäre entfernt werden müssten. Betrachtet man im Gegensatz zu diesem hypothetischen Szenario die jüngsten Emissionstrends, die tatsächliche Klimapolitik, sowie die bestehende (Energie-)Infrastruktur und blickt man zusätzlich auf die jüngsten Wahlergebnisse und politischen Entscheidungen in den Vereinigten Staaten und Brasilien wird die Dimension der Herausforderung sehr deutlich: Es geht nicht mehr nur um die Verringerung der CO₂-Emissionen. Inzwischen ist neben der zwingend erforderlichen schnellen Senkung der CO₂-Emissionen der substanzielle Einsatz von NETs notwendig, um die versprochenen Klimaziele zu erreichen (Strefler et al. 2018).

In ihrer Bestimmung der sozio-ökonomischen Untergrenze nehmen van Vuuren et al. (2018) an, dass die negativen Emissionen durch großskalige Aufforstung realisiert werden. Aufforstung, also das Pflanzen von Bäumen, wird in der Bevölkerung als gutartige Methode wahrgenommen und stößt kaum auf Ressentiments (Braun et al. 2018). Bei realistischer Betrachtung zukünftiger Emissionspfade wird ambitionierter Klimaschutz aber auch vom Einsatz weniger populärer NETs abhängen. Es wird davon ausgegangen, dass die Verwendung eines Portfolios verschiedener NETs im Vergleich zum großskaligen Einsatz einer einzelnen oder einiger weniger Technologien als sowohl leichter umsetzbar als auch nachhaltiger wäre (IPCC 2018). Die derzeitig verwendeten integrierten Bewertungsmodelle und damit die Szenarien, die bei der Erstellung des Sonderberichts des Weltklimarats berücksichtigt wurden, beschränken sich aber größtenteils auf die Untersuchung von Aufforstung und Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS). Sie spiegeln weder die Palette der diskutierten potenziellen NETs noch Portfolios und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen negativen Emissionstechnologien wider (IPCC 2018). Entsprechend bedarf es noch einen erheblichen Forschungsaufwand sowohl einzelne NETs besser zu verstehen und zu modellieren als auch deren Wechselwirkungen in integrierten Bewertungsmodellen zu berücksichtigen.

4 Marktanreize für die dezentrale Entwicklung von NETs

Neben der Erforschung großskaliger, wahrscheinlich staatlich koordinierter, Projekte wie die Aufforstung großer Gebiete in Australien oder die Ausbringung von Olivin entlang der Küsten, rücken zunehmend kleinskalige und dezentral entwickelte, durch staatliche Förderung vorangetriebene oder initiierte Projekte in den Fokus. So gibt es bereits einige junge Unternehmen, die die Entwicklung des chemischen Herausfilterns von CO₂ aus der Luft („Direct-Air-Capture“, DAC) vorantreiben. Das Schweizer Unternehmen Climeworks betreibt unter anderem zu Demonstrationszwecken eine kleine DAC-Anlage in der Nähe von Zürich und verkauft das eingefangene CO₂ an Betreiber von Gewächshäusern. Die dezentrale Einsetzbarkeit dieser Technologie bietet die Möglichkeit, dass entsprechende

Anlagen in der Nähe geeigneter Lagerstätten oder in der Nähe CO₂-freier Energiequellen, die nicht oder nur schwierig ins Stromnetz einzubinden sind, aufzustellen (Rickels et al. 2011). Diese Idee wird von dem Demonstrationsprojekt CarbFix auf Island aufgegriffen. Dort wird das energieintensive DAC-Verfahren mit erneuerbaren Energien aus Geothermie betrieben und das eingefangene CO₂ in dem dort vorhandenen porösen Basaltgestein eingelagert, wo das CO₂ zu Karbonat mineralisiert und praktisch permanent gespeichert wird (Matter et al. 2016). An dem Projekt sind neben Climeworks, staatliche Energieversorger aus Island, sowie Forschungseinrichtungen und Universitäten beteiligt; gefördert wurde es unter anderem durch das Horizon 2020 Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Europäischen Union. DAC könnte auch eine Möglichkeit darstellen, überschüssige Elektrizität in Stromnetzen mit einem hohen Anteil volatiler erneuerbarer Energiequellen zu nutzen (Wohland et al. 2018). Eine weitere Idee für dezentral einsetzbare und flexible Möglichkeiten CO₂ zu speichern, ist zum Beispiel der zunehmende Einsatz schnell wachsender Weichhölzer im Bauwesen (The Royal Society 2018).

Grundsätzlich gilt aber für die Forschungsförderung von NETs, wie auch die Förderung erneuerbarer Energien oder alternativer Antriebstechnologien im Verkehrssektor, dass die frühzeitige Festlegung auf bestimmte Technologien zu vermeiden und dass der Erfolg der Förderprogramme nicht anhand der Entwicklung von Vorzeigeprojekten, sondern anhand der Entwicklung des Projektportfolios zu beurteilen ist (Rodrik 2014). Die finanzielle Forschungsförderung muss sich auf Forschungs- und Entwicklungs- sowie Demonstrationsprojekte beschränken und sollte nicht die marginalen Anreize für den Einsatz der Technologie über den durch den CO₂-Preis gegebenen, hinaus beeinflussen (Antoniou und Strausz 2017). Sobald die Technologien ausgereift genug sind, ist der Umfang ihrer Einsatzes durch die Einbeziehung in CO₂-Emissionshandelssysteme oder (freiwillige) CO₂-Kompensationsmärkte, um zum Beispiel die CO₂-Emissionen von Flügen auszugleichen, zu bestimmen. Dies erfordert natürlich wissenschaftlich fundierte Methoden, um den tatsächlichen Beitrag der Technologien zur Reduzierung der atmosphärischen CO₂-konzentration und ihre potenziellen Nebenwirkungen angemessen zu berücksichtigen. Sobald eine solche Marktintegration der verschiedenen NETs erreicht ist, würde der resultierende CO₂-Preis den Umfang der negativen Emissionen sowie das Ausmaß der Substitution herkömmlicher Emissionsvermeidung bestimmen.

5 Eine unbequeme Wahrheit

Der Sonderbericht über die mögliche Begrenzung des anthropogenen Klimawandels auf 1,5°C des Weltklimarats (IPCC 2018) bietet eine umfassende Zusammenfassung und Erklärung des derzeitigen Wissenstandes über die Herausforderungen das ambitionierte Temperaturziel zu erreichen. Die veröffentlichten Anhänge zu den einzelnen Kapiteln sowie die zugehörige Szenarien-Datenbank erlauben es die angewandten Methoden und Szenarien nachzuvollziehen (Huppmann et al. 2018). Gemessen an der Fülle der Informationen, überrascht es nicht, dass in der

Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger verschiedene zugrundeliegende Annahmen nur verkürzt dargestellt werden können. Sehr wohl überrascht es aber, wie verschiedene politische Akteure oder Vertreter von Nicht-Regierungsorganisationen die Ausweitung des CO₂-Budgets (im Vergleich zum fünften Sachstandsbericht) interpretieren.

Interpretationen, die sich auf eher große verbleibende CO₂-Budgets stützen und damit gleichzeitig die Rolle von NETs für die Erreichung des Temperaturziels herunterspielen, führen nicht zu verantwortungsvollen oder vorausschauenden Einschätzungen der (Forschungs-)Herausforderung: Wir müssen jetzt die Grenzen und Auswirkungen der verschiedenen NETs und ihre Wechselwirkungen verstehen, wenn die von uns angestrebten Minderungspfade realistisch sein sollen. Eine umsichtige Annäherung an das Thema könnte darin bestehen, NETs nicht nur als notwendiges Übel der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu betrachten, um die Untätigkeit in der ersten Hälfte des Jahrhunderts auszugleichen, sondern als wichtigen Bestandteil eines klimapolitischen Technologie- und Maßnahmenportfolios. Das beinhaltet die Möglichkeit die angestrebten Temperaturziele durch den Einsatz von NETs bereits in der ersten Hälfte des Jahrhunderts zuverlässiger zu erreichen (Obersteiner et al. 2018). Vor diesem Hintergrund kann man die Betonung der Dringlichkeit umfassender Forschung der US-amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018) sowie der britischen Royal Society and Academy of Engineering nur begrüßen. Natürlich ist es aber auch legitim, sich aufgrund verschiedener naturwissenschaftlicher, ökonomischer und gesellschaftlicher Probleme, die diese Technologien mit sich bringen können, grundsätzlich gegen deren Einsatz auszusprechen, dann sollte man aber gleichzeitig auch nicht verschweigen, dass die Erreichung ambitionierter Temperaturziele nicht mehr realistisch ist.

Literaturverzeichnis

Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyn und D. Hemous (2012), The Environment and Directed Technical Change, *American Economic Review* 102(1), S. 131–66.

Acemoglu, D. und W. Rafey (2018), Mirage on the Horizon. Geoengineering and Carbon Taxation Without Commitment. Working Paper. National Bureau of Economic Research (Working Paper Series, 24411). Online verfügbar unter <http://www.nber.org/papers/w24411>.

Allen, M. R., D.J. Frame, C. Huntingford, C.D. Jones, J.A. Lowe, M. Meinshausen und N. Meinshausen (2009), Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458, 1163..

Antoniou, F. und R. Strausz (2017), Feed-in Subsidies, Taxation, and Inefficient Entry, *Environmental and Resource Economics* 67(4), S. 925–40.

Boucher, O.; P.R. Halloran, E.J. Burke, M. Doutriaux-Boucher, C.D. Jones, J. Lowe, et al. (2012), Reversibility in an Earth System model in response to CO₂ concentration changes, *Environmental Research Letters* 7(2), S. 24013.

- Braun, C., C. Merk, G. Pönitzsch, K. Rehdanz und U. Schmidt (2018), Public perception of climate engineering and carbon capture and storage in Germany, Survey evidence, *Climate Policy* 18(4), S. 471–84.
- Fischer, C. und R.G. Newell (2008), Environmental and technology policies for climate mitigation, *Journal of Environmental Economics and Management* 55(2), S. 142–62.
- Geden, O. und A. Löschel (2017), Define limits for temperature overshoot targets, *Nature Geoscience* 10(12), S. 881–82.
- Hausfather, Z. (2018): Analysis: Why the IPCC 1.5C report expanded the carbon budget. CarbonBrief. Online verfügbar unter <https://www.carbonbrief.org/analysis-why-the-ipcc-1-5c-report-expanded-the-carbon-budget>, zuletzt aktualisiert am 21.10.2018.
- Huppmann, D., E. Kriegler, V. Krey, K. Riahi, J. Rogelj, S.K. Rose et al. (2018), IAMC 1.5°C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA. Hg. v. Integrated Assessment Modeling Consortium & International Institute for Applied Systems Analysis (doi: 10.22022/SR15/08-2018.15429).
- IPCC (2018): Summary for Policymakers. In: V. Masson-Delmotte und P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla (Hg.): Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Genf, Schweiz.
- Jaffe, A. B., R.G. Newell und R.N. Stavins, Robert N. (2005), A tale of two market failures. Technology and environmental policy. *Ecological Economics* 54(2), S. 164–74.
- Kelly, D.L. und C.D. Kolstad (1999), Bayesian learning, growth, and pollution, *Journal of Economic Dynamics and Control* 23(4), S. 491–518.
- Klimarahmenkonvention (2015): Paris Agreement. Hg. v. United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC. Online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.2018.
- Kriegler, E., G. Luderer, N. Bauer, L. Baumstark, S. Fujimori, Shinichiro, A. Popp et al. (2018): Pathways limiting warming to 1.5°C. A tale of turning around in no time? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 376 (2119).
- Leach, N.J., R.J. Millar, K. Haustein, S. Jenkins, E. Graham, M.R. Allen (2018), Current level and rate of warming determine emissions budgets under ambitious mitigation. *Nature Geoscience* 11 (8), S. 574–79.

- Matter, J. M., M. Stute, S.O. Snæbjörnsdóttir, E.H. Oelkers, S.R. Gislason, E.S. Aradóttir, et al. (2016), Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 352 (6291), S. 1312.
- Mauritsen, T. und R. Pincus (2017), Committed warming inferred from observations. *Nature Climate Change* 7, 652.
- Moslener, U. und T. Requate (2009), The dynamics of optimal abatement strategies for multiple pollutants—An illustration in the Greenhouse. *Ecological Economics* 68(5), S. 1521–34.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2018): Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC: The National Academies Press. Online verfügbar unter doi.org/10.17226/25259.
- Nordhaus, W. D. (1991), A Sketch of the Economics of the Greenhouse Effect, *The American Economic Review* 81(2), S. 146–50.
- Nordhaus, W. D. (1992): An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases, *Science* 258 (5086), S. 1315..
- Obersteiner, M., J. Bednar, F. Wagner, T. Gasser, P. Ciais, N. Forsell et al. (2018), How to spend a dwindling greenhouse gas budget. *Nature Climate Change* 8(1), S. 7–10.
- OECD (2018): Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2018. OECD Publishing. Paris (https://doi.org/10.1787/agr_pol-2018-en).
- Quaas, M. F., J. Quaas, W. Rickels, O. Boucher (2017), Are there reasons against open-ended research into solar radiation management? A model of intergenerational decision-making under uncertainty, *Journal of Environmental Economics and Management* 84, S. 1–17.
- Rickels, W.; G. Klepper, J. Dovern, G. Betz, N. Brachatzek, S. Cacean, K. Güssow et al. (2011), Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Kiel Earth Institute. Kiel. Online verfügbar unter https://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html?file=files/media/downloads/CE_gesamtstudie.pdf, zuletzt geprüft am 12.11.2018.
- Rickels, W., F. Reith, D. Keller, A. Oschlies und M.F. Quaas, M. F. (2018): Integrated Assessment of Carbon Dioxide Removal, *Earth's Future* 6(3), S. 565–82.
- Schuur, E.A.G., A.D. McGuire, C. Schädel, G. Grosse, J.W. Harden, D.J. Hayes et al. (2015), Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, S.171.
- Seneviratne, S.I., J. Rogelj, R. Séférian, R. Wartenburger, M.R. Allen, M. Cain (2018): The many possible climates from the Paris Agreement's aim of 1.5 °C warming. *Nature* 558 (7708), S. 41–49.

Smith, P.; M. Bustamante, H. Ahammad et al. (2014): Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In: O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona und et al. (Hg.): Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, S. 811–922.

Springmann, M., D. Mason-D’Croz, S. Robinson, K. Wiebe, H.C.J. Godfray, M. Rayner und P. Scarborough (2017): Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities. *Nature Climate Change* 7, 69.

Strefler, J., N. Bauer, E. Kriegler, A. Popp, A. Giannousakis und O. Edenhofer (2018): Between Scylla and Charybdis. Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs. *Environmental Research Letters* 13(4), S. 44015.

The Royal Society (2018): Greenhouse Gas Removal.

van Vuuren, D.P.; E. Stehfest, D.E.H.J. Gernaat, M. van den Berg, D.L. Bijl, H.S. Boer et al. (2018): Alternative pathways to the 1.5 °C target reduce the need for negative emission technologies. *Nature Climate Change* 8(5), S. 391–97.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung (WBGU) (2018): Zeit–gerechte Klimapolitik: Vier Initiativen für Fairness (Politikpapier, 9).

Wohland, J., D. Witthaut und C.F. Schleussner, (2018): Negative Emission Potential of Direct Air Capture Powered by Renewable Excess Electricity in Europe. *Earth’s Future* 6 (10), S.1380–84.

Wollenberg, E., M. Richards, P. Smith, P. Havlík, M. Obersteiner, F.N. Tubiello, et al. (2016): Reducing emissions from agriculture to meet the 2 °C target, *Global Change Biology* 22 (12), S. 3859–64.