

Beitrag aus der Forschung

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

Welche Rolle spielen negative Emissionen für die zukünftige Klimapolitik?

Eine ökonomische Einschätzung zum 1,5 °C-Sonderbericht des Weltklimarats

<https://doi.org/10.1515/wpw-2018-0034>

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 die Interpretationen des aktuellen Sonderberichts des Weltklimarats stark auseinander. 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 realistischen Einschätzungen der zukünftigen (Forschungs-)Herausforderung: Wir müssen bereits jetzt die Wirksamkeit verschiedener NETs, ihre Grenzen und ihre Wechselwirkungen verstehen, wenn die international angestrebten CO₂-Konzentrationspfade realistisch sein sollen. Eine verfrühte Festlegung auf bestimmte NETs sollte vermieden werden. Sobald die Technologien, die sich als effizient erweisen, ausgereift sind, sollte der Umfang ihres Einsatzes durch die Einbeziehung in CO₂-Emissionshandelssysteme oder CO₂-Emissionssteuerregime bestimmt werden.

***Kontaktperson: Wilfried Rickels**, Institut für Weltwirtschaft, Kiellinie 66, 24105 Kiel, E-Mail: wilfried.rickels@ifw-kiel.de
Christine Merk, Institut für Weltwirtschaft, Kiellinie 66, 24105 Kiel, E-Mail: christine.merk@ifw-kiel.de
Johannes Honneth, Institut für Weltwirtschaft, Kiellinie 66, 24105 Kiel, E-Mail: johanneshonneth@gmx.de
Jörg Schwinger, NORCE, Norwegisches Forschungszentrum (Bjerknes Centre for Climate Research), 5007 Bergen, Norwegen, E-Mail: jorg.schwinger@norceresearch.no
Martin Quaas, Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv) Halle-Jena-Leipzig, Universität Leipzig, E-Mail: martin.quaas@idiv.de
Andreas Oschlies, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Düsternbrooker Weg 20, 24105 Kiel, E-Mail: aoschlies@geomar.de

JEL-Klassifikation: Q54, O32

Schlüsselwörter: Klimawandel, Pariser Klimavertrag, CO₂-Budgets, Nicht-CO₂-Treibhausgase, 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 im Pariser Klimaschutzübereinkommen festgelegt wurde, den langfristigen, menschengemachten Temperaturanstieg auf deutlich unter 2 °C und idealerweise auf 1,5 °C zu begrenzen (Klimarahmenkonvention 2015), werden die CO₂-Budgets zunehmend als Kennzahl genutzt, um die Herausforderungen für den zukünftigen Klimaschutz zusammenzufassen. Das CO₂-Budget veranschaulicht zum Beispiel, wie viele Jahre die Weltgemeinschaft ihre jetzigen CO₂-Emissionen (theoretisch) noch fortsetzen könnte, ohne die gesteckten Temperaturziele zu überschreiten.

Im Herbst 2018 veröffentlichte der Weltklimarat (IPCC) seinen Sonderbericht zur Begrenzung des anthropogenen Klimawandels auf 1,5 °C (SR1.5). Die Schätzung für das verbleibende CO₂-Budget in der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger ist um 300 Gigatonnen (Gt) größer als die Schätzungen im Fünften Sachstandsbericht von 2014 (IPCC 2018). Diese auf neuen Erkenntnissen und Messungen basierende Ausweitung ist erst einmal eine gute Nachricht, da sie den Spielraum für die Einhaltung des Temperaturziels erweitert. Gemessen an der ursprünglichen Schätzung für das verbleibende CO₂-Budget im Fünften Sachstandsbericht, wäre das Budget bereits heute

nahezu verbraucht und es physikalisch nicht mehr möglich, das Temperaturziel von 1,5 °C ohne negative Emissionen einzuhalten.

Wird der Atmosphäre CO₂ entzogen, spricht man von negativen Emissionen. Die dafür eingesetzten Technologien werden entsprechend als negative Emissionstechnologien (negative emission technologies, NETs) bezeichnet. Mit Hilfe dieser Technologien versucht man, natürlich stattfindende biologische, chemische und physikalische Prozesse im globalen Kohlenstoffkreis zu verstärken oder künstlich zu imitieren; dadurch wird CO₂ der Atmosphäre entzogen und im Ozean oder in der terrestrischen Biosphäre angereichert oder geologisch gespeichert (Rickels et al. 2011). Eine Übersicht über die verschiedenen Technologien sowie Schätzungen zu deren Kosten und Potentialen findet sich basierend auf dem aktuellen Bericht der Royal Society (2018) sowie der National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) im Anhang A. Mit dem Einsatz von NETs sind aber noch zahlreiche Unsicherheiten verbunden. Deshalb empfiehlt der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung (WGBU) (2018), den Ausstoß von CO₂ und anderen Treibhausgasen so schnell wie möglich zu reduzieren, um die Notwendigkeit des zukünftigen Einsatzes dieser spekulativen Technologien zu minimieren.

Für die Debatte um den zukünftigen Einsatz negativer Emissionen muss man allerdings zuerst berücksichtigen, dass die CO₂-Budgetschätzung aus der Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger des Weltklimarates nur ein Wert aus einer großen Bandbreite von Schätzungen ist, dessen Einordnung der Berücksichtigung verschiedener Bestimmungsfaktoren bedarf. Die große Bandbreite der Schätzungen für das verbleibende CO₂-Budget überrascht – auf den zweiten Blick. Bereits seit der Einführung der ersten integrierten Bewertungsmodelle durch William Nordhaus (1991, 1992) sehen sich Klimaökonominnen damit für die sozialen Kosten von CO₂ („social cost of carbon“) konfrontiert. Diese Bandbreite der sozialen Kosten (als Teil einer Kosten-Nutzen-Analyse) impliziert dasselbe für die verbleibenden CO₂-Budgets. Sie erklärt sich vor allem durch die hohe Unsicherheit bei der quantitativen Abschätzung der Klimaschäden und deren (stochastischer) Abbildung in Kosten-Nutzen-Modellen, sowie durch die unterschiedlichen Parametrisierungen der sozialen Diskontrate.

Mit der Verabschiedung des Pariser Klimaabkommens vereinfacht sich die bisherige Kosten-Nutzen-Fragestellung mit einem endogen bestimmten Ausmaß des Klimawandels zu einer Kosten-Effizienz-Fragestellung, innerhalb derer ein exogen festgelegtes Temperaturziel kosteneffizient zu erreichen ist. Entsprechend entfällt das Problem der mit großen Unsicherheiten behafteten expliziten Modellierung

zukünftiger Klimaschäden. Für die exogenen Temperaturziele werden angesichts der Unsicherheit im Klimasystem Minimum-Erreichungswahrscheinlichkeiten definiert (in der Regel wird zwischen einer 50- und 66-prozentigen Einhaltungswahrscheinlichkeit unterschieden).¹ Erwartungsgemäß ist die Bandbreite der derzeit diskutierten CO₂-Budgets deutlich geringer als bei CO₂-Budgets, die sich implizit aus Kosten-Nutzen-Analysen ergeben würden. Allerdings ist die Bandbreite immer noch sehr groß. Kriegler et al. (2018) fassen aktuelle Schätzungen in einer Metaanalyse zusammen und zeigen, dass die Budgetschätzungen für eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit 1,5 °C nicht zu überschreiten eine Bandbreite von -182 bis zu 818 Gt CO₂ haben. Neuere Schätzungen heben die obere Grenze der Bandbreite sogar noch weiter an. So schätzen Leach et al. (2018), dass das verbleibende CO₂-Budget sogar bis zu 1239 Gt CO₂ betragen könnte (wieder für eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit 1,5 °C nicht zu überschreiten). Je nachdem, ob man sich auf das untere oder das obere Ende der geschätzten Bandbreite stützt, kommt man zu sehr unterschiedlichen klimapolitischen Einschätzungen. Entweder schlussfolgert man, dass die Weltgemeinschaft ihr CO₂-Budget für das 1,5 °C-Ziel bereits verbraucht hat, und dass daher nicht nur ein rapider Umbau der globalen Wirtschafts- und Energiesysteme notwendig ist, um ambitionierten Klimaschutz zu erreichen, sondern gleichzeitig ein massiver Einsatz von NETs. Oder man kommt zu dem Ergebnis, dass die derzeitigen CO₂-Emissionen noch für etwa 31 Jahre fortgesetzt werden könnten, ohne die Temperaturziele zu gefährden; notwendig wäre dann ein moderater Umbau der Energie- und Wirtschaftssysteme, ohne einen signifikanten Einsatz von NETs.

Doch warum sind die Bandbreiten so groß? Zu einem großen Teil lässt sich das durch unterschiedliche Ansätze in der Messung des bereits eingetretenen Temperaturanstiegs, unterschiedliche Annahmen über die Entwicklung anderer Treibhausgasemissionen als CO₂, den Zeithorizont für das verbleibende Budget, sowie das Ausmaß eines kurzfristigen Überschreitens des Temperaturziels erklären. Wie sich diese Bestimmungsfaktoren im Detail technisch auswirken, ist nicht die Frage, die wir in diesem Artikel behandeln; sehr wohl aber die Implikationen ihrer Festlegung für die Interpretation der Budgetschätzungen

¹ Unter expliziter Berücksichtigung von Unsicherheit in einem stochastischen integrierten Bewertungsmodell würde die Lösung durch Chance Constrained Programming (CCP) errechnet (Held et al. 2009). Aufgrund konzeptioneller Probleme bei der Anwendung von CCP im Hinblick auf die mögliche Nichterreichbarkeit des vorgegebenen Ziels sowie auf die Bewertung von Lernen schlagen Schmidt et al. (2011) stattdessen die Anwendung einer Kosten-Risiko-Analyse vor.

sowie für die Klimapolitik und die Bewertung von NETs.² Es erscheint (politisch) verlockend, sich auf höhere Budgetschätzungen zu stützen, um die Schlussfolgerung zu vermeiden, dass die ehrgeizigen Pariser Klimaziele ohne die tiefgreifende Veränderung unserer Lebensstile sowie den unpopulären Einsatz von NETs nicht einhaltbar sind.

2 Bestimmungsfaktoren für das verbleibende CO₂-Budget

Die verschiedenen Bestimmungsfaktoren wirken sich technisch auf die Höhe des verbleibenden CO₂-Budgets aus und basieren auf (impliziten) Entscheidungen zur regionalen und zeitlichen Verteilung der Kosten des Klimawandels. Verantwortungsvolle und vorausschauende Klimapolitik erfordert eine transparente Diskussion sowie explizite Entscheidungen über diese Bestimmungsfaktoren.

2.1 Wie misst man den globalen Temperaturanstieg?

Dieser Punkt erscheint trivial, aber im Pariser Abkommen ist nicht genau definiert, wie eine Temperaturerhöhung von 1,5 °C gemessen werden soll. Je nachdem wie man die historische mittlere globale Temperatur (den Ausgangspunkt) definiert, erhält man unterschiedliche Werte für die bereits eingetretene globale Erwärmung. Ebenso ergeben sich aus unterschiedlichen Definitionen der (gemessenen oder modellierten) mittleren globalen Temperatur unterschiedliche Schätzungen für das verbleibende CO₂-Budget. Bestimmt man den Temperaturanstieg anhand der „globalen Durchschnittstemperatur an der Oberfläche“, beträgt das verbleibende CO₂-Budget für das 1,5 °C-Ziel in der Schätzung des Weltklimarats 570 Gt CO₂ (vom 1. Januar 2018 an und für eine Wahrscheinlichkeit von 66 Prozent, das Temperaturziel nicht zu überschreiten) (IPCC 2018). Bei dieser Definition geht die Temperatur der Meeresoberfläche in die Berechnung der globalen Durchschnittstemperatur ein. Verwendet man stattdessen als Metrik die „Globale Luftdurchschnittstemperatur an der Oberfläche“, sinkt das verbleibende CO₂-Budget auf 420 Gt CO₂ (IPCC 2018).

² Hausfather (2018a, b) bietet eine exzellente Übersicht über die technischen Gründe für unterschiedliche CO₂-Budgetschätzungen und darüber, wie diese in den Sonderbericht des Weltklimarats eingegangen sind.

Die Datensätze, die zur Berechnung der historischen, heutigen und zukünftigen (modellbasierten) globalen Temperaturen verwendet werden, unterscheiden sich auch in der regionalen Abdeckung. Einige auf Beobachtungen basierende Datensätze decken beispielsweise die arktischen Regionen nicht ab. Gerade die arktischen Regionen erwärmen sich aber überproportional stark im Vergleich zur restlichen Welt. Berücksichtigt man diese Regionen bei der Berechnung der globalen Durchschnittstemperaturen, sinkt das verbleibende CO₂-Budget auf bis zu 260 Gt CO₂ (Hausfather 2018).

Das zeigt nicht nur, dass die Verwendung von CO₂-Budgetschätzungen in der Klimapolitik eine klare politische Definition des Begriffes „globaler Temperaturanstieg“ erfordert, sondern ebenfalls, dass ein globaler Grenzwert nur bedingt Rückschlüsse auf den regionalen Temperaturanstieg zulässt. Simulationen mit Erdsystemmodellen zeigen, dass es bei einem globalen mittleren Temperaturanstieg von 1,5 °C in den Vereinigten Staaten³ und Zentralbrasilien zu einer Erwärmung von 2 °C beziehungsweise 2,3 °C und in der Arktis sogar von bis zu 4,2 °C kommen könnte (Seneviratne et al. 2018). Die verstärkte Erwärmung auf dem Land wird durch eine schwächere Erwärmung über dem Ozean im globalen Mittel ausgeglichen. Damit wird deutlich, dass sich selbst dann, wenn es gelingt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf 1,5 °C zu begrenzen, verschiedene Regionen auf höhere Temperaturen und stärkere Auswirkungen des Klimawandels einstellen müssen. In welchem Maße sie das müssen, hängt davon ab, wie der globale Temperaturanstieg und damit die globalen Temperaturziele gemessen werden.

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

Eine effiziente Klimapolitik erfordert explizite Vermeidungsstrategien für die Emissionen anderer Treibhausgase als CO₂ (Moslener und Requate 2009). Zukünftige Methan- und Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft, der Abfallentsorgung und der Verbrennung von Biomasse, aber auch Aerosolemmissionen, die derzeit einen erheblichen Teil des treibhausgasbedingten Strahlungsantriebs kompensieren und somit kühlend wirken, haben einen starken Einfluss auf die Höhe des verbleibenden CO₂-Emissionsbudgets. Unterstellt man zum Beispiel, dass die nicht-CO₂-Emissionen 0,5 °C statt nur 0,3 °C zur zukünftigen Erwärmung

³ Ohne Inseln und Alaska.

mung beitragen, reduziert sich das verbleibende CO₂-Budgets für das 1,5 °C Ziel bei einer Einhaltungswahrscheinlichkeit von 50 Prozent um etwa 500 Gt CO₂ (Kriegler et al. 2018). Entsprechend ist selbst bei einer großzügigen Schätzung, bereits heute das verbleibende CO₂-Budget nahezu verbraucht, wenn es nicht gelingt, die Emissionen im Agrarsektor nachhaltig zu reduzieren.

Der Agrarsektor trägt insbesondere durch Methan und Lachgasemissionen ungefähr 11 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen (ohne Emissionen aus der Landnutzungsänderung) bei (Smith et al. 2014). 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, dort die Nicht-CO₂-Emissionen zu reduzieren (Springmann et al. 2017). Während viele Länder in ihren national festgelegten Beiträgen 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.

Die Erwärmung des globalen Klimas wird aber nicht allein durch die Emission von Treibhausgasen bestimmt, sondern ebenfalls durch Aerosolemmissionen, die sowohl über ihren Einfluss auf die Wolkenbildung, als auch durch die direkte Reflektion von Sonnenlicht abkühlend wirken und daher einen Teil der erwärmenden Wirkung der Treibhausgase kompensieren. Aerosolemmissionen, wie zum Beispiel industrielle Schwefeldioxidemissionen, wirken jedoch lokal als Luftschadstoffe mit negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und werden daher aus guten Gründen zunehmend reguliert. Damit entfällt allerdings auch ein Teil der kühlenden Wirkung. Entsprechend haben zukünftige Regulierungen zur Reduktion der Luftschadstoffe und damit die Annahmen über die Entwicklung der Aerosolemmissionen einen starken Einfluss auf die Höhe des verbleibenden CO₂-Emissionsbudgets. Mauritsen und Pincus (2017) zeigen, dass selbst bei einem sofortigen (theoretischen) Stopp aller fossilen CO₂-Emissionen (und damit der physikalischen Einhaltung des CO₂-Budgets) immer noch ein 13-prozentiges Risiko besteht das 1,5 °C-Ziel zu überschreiten. Ein wesentlicher Grund für dieses Ergebnis ist neben der Erwärmung durch Nicht-CO₂-Emissionen, das Fehlen der kühlenden Aerosolemmissionen aus dem Energiesektor. Natürlich ist dies kein Argument für die Nichtreduktion der fossilen CO₂-Emissionen, unter-

streicht aber, dass sich effektiver Klimaschutz nicht nur auf CO₂-Emissionen beschränken darf (Moslener und Requate 2009) und dass die Interpretation der Schätzungen für das verbleibende CO₂-Budget eine explizite Berücksichtigung der unterstellten Nicht-CO₂-Emissionsvermeidung bedürfen.

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 im Bericht des Weltklimarats gilt aber nur bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts. Etwa zu diesem Zeitpunkt fallen in den Szenarien, die es erlauben, den Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen, die CO₂-Emissionen netto auf null. Das errechnete verbleibende CO₂-Budget—die kumulativen Emissionen bis zu diesem Zeitpunkt—stellt somit bereits ein Netto-Budget dar, da negative Emissionstechnologien zum Einsatz kommen müssen, um die Brutto-Emissionen zu reduzieren.

Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts werden die Netto-CO₂-Emissionen bei den betrachteten Szenarien negativ, das heißt, es wird der Atmosphäre mehr CO₂ entzogen als zugeführt. Die Entnahme führt dazu, dass die globale Temperatur unter 1,5 °C bleibt. Sie kompensiert zusätzlich in Teilen die fortwährende Erwärmung durch Nicht-CO₂-Emissionen. Entsprechend ist das verbleibende CO₂-Budget geringer, wenn es für den Zeitraum bis zum Ende des Jahrhunderts angegeben wird. Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, haben die Annahmen über die Entwicklung der Nicht-CO₂-Emissionen einen erheblichen Einfluss auf das verbleibende Budget. Kommt es zu einer geringeren Reduktion der Nicht-CO₂-Emissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts, werden zusätzliche negative CO₂-Emissionen benötigt, um den Temperaturanstieg unter 1,5 °C zu halten, und das verbleibende CO₂-Budget (bis zum Ende des Jahrhunderts) wird negativ.

Konzentriert man sich in der Kommunikation auf das verbleibende CO₂-Budget, das für den Zeitraum bis zur Mitte des Jahrhunderts berechnet wurde, verschleiert man teilweise die Herausforderungen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts im Hinblick auf den Einsatz von NETs.

2.4 Darf die Temperatur den Grenzwert temporär überschreiten?

411 Szenarien aus integrierten Bewertungsmodellen werden bei den Berechnungen der CO₂-Budgets für den Son-

derbericht 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 fünf Szenarien nicht zu einer temporären Überschreitung des Grenzwertes.⁴ In allen anderen Szenarien kommt es zeitweise zu globaler Erwärmung über 1,5 °C und damit zu noch stärkeren regionalen Veränderungen (vgl. Abschnitt 2.1). Das Ausmaß der Überschreitung hat keinen direkten Einfluss auf das Netto-CO₂-Budget in diesen Szenarien, weil die langsamere Reduktion der CO₂-Emission später durch NETs kompensiert wird. Diese Beziehung gilt allerdings nicht exakt, da negative Emissionen das Budget nicht linear, sondern aufgrund von Rückkopplungsprozessen im Kohlenstoffkreislauf unterproportional vergrößern (Rickels et al. 2018).

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). Sie bergen aber das Risiko, schwer reversible Erdsystemprozesse anzustoßen, wie zum Beispiel das Auftauen von Permafrostböden und die damit verbundene Freisetzung von CO₂ und Methan (Gasser et al. 2018). Werden solche nur langsam umkehrbare oder sogar irreversible Prozesse angestoßen, ist eine erhebliche zusätzliche Menge an negativen Emissionen erforderlich, um die Temperatur innerhalb dieses Jahrhunderts wieder abzusenken (vgl. Schuur 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 der Zieltemperatur von beispielsweise 1,5 °C 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 Löschel 2017).

⁴ 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.

3 Die Rolle negativer CO₂-Emissionen für die internationale Klimapolitik

In dem Maße, wie die prognostizierten CO₂-Emissionen ihr übersteigen, werden (mindestens) negative CO₂-Emissionen benötigt. Entsprechend ergibt sich zusätzlich zu der Bandbreite bei den CO₂-Budgets (in Abhängigkeit von den Bestimmungsfaktoren) die Unsicherheit, wie umfangreich und wie schnell die zukünftigen CO₂-Emissionen global gesenkt werden können. Der Weltklimarat schätzt den Bedarf an negativen Emissionen zwischen 100 und 1000 Gt CO₂ bis zum Ende des Jahrhunderts (für die Szenarien die den 1,5 °C Grenzwert gar nicht oder nur geringfügig überschreiten). Dieser Einschätzung liegen allerdings teilweise sehr anspruchsvolle Annahmen bezüglich der zukünftigen Anstrengungen zur Emissionskontrolle zugrunde. Das sei exemplarisch an dem Szenario von van Vuuren et al. (2018) verdeutlicht. Die Autoren kombinieren die folgenden sehr optimistischen Annahmen über die sozio-ökonomische Entwicklung, um zu ermitteln, welche Menge negativer Emissionen aus ihrer Sicht mindestens notwendig wäre, um das 1,5 °C-Ziel einzuhalten:

- i) ab 2020 gibt es in allen Regionen und Sektoren der Weltwirtschaft eine einheitliche CO₂-Steuer,
- ii) eine sehr schnelle Steigerung der Energie- und Materialeffizienz, der Elektrifizierungsraten und des Einsatzes erneuerbarer Energien in Energie, Industrie und Verkehr weltweit,
- iii) die Menschen entscheiden sich für einen CO₂-armen Lebensstil (beim Heizen, Reisen, Einsatz von Haushaltsgeräten, etc.) und eine fleischarme Ernährung, die ab 2050 vollständig durch kultiviertes Fleisch gedeckt wird, sodass auch die Nicht-CO₂-Emissionen im Agrarsektor stark sinken, und
- iv) die Bevölkerung wächst nur vergleichsweise langsam bzw. schrumpft (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 kommen van Vuuren et al. (2018) zu der Einschätzung, dass für die Einhaltung des 1,5 °C-Ziels bis zum Ende des Jahrhunderts zusätzlich etwa 400 Gt CO₂ der Atmosphäre entzogen werden müssen. Betrachtet man im Gegensatz zu diesem hypothetischen Szenario die jüngsten Emissionstrends, die tatsächliche Klimapolitik, wie sie bislang im Rahmen der national festgelegten Beiträge zum Pariser Klimaabkommen festgelegt wurde, sowie die bestehende Energieinfrastruktur, und blickt gleichzeitig auf die jüngsten Wahlergebnisse und politi-

schen Entscheidungen in den Vereinigten Staaten und Brasilien, wird die Dimension der Herausforderung sehr deutlich. Neben der zwingend erforderlichen schnellen Senkung der Treibhausgasemissionen ist der substanzielle Einsatz von NETs erforderlich, um die vereinbarten Klimaziele zu erreichen (Strefler et al. 2018). Das gilt umso mehr, wenn zum Beispiel die Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft wenig oder gar nicht bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Klimawandel besteuert werden oder wenn von einem verstärkten Einsatz der Kernenergie abgesehen wird. In den Szenariengruppen des Weltklimarates, denen sowohl eine rasche Reduktion der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2030 als auch eine Senkung der Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft als Annahme zugrunde liegen, wird gleichzeitig eine Ausweitung der Kernenergienutzung zwischen 98 und 150 Prozent bis zum Jahr 2050 (relativ zum Jahr 2010) unterstellt. Wird unter anderem eine geringe Reduktion der Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft angenommen, beträgt die unterstellte Ausweitung der Kernenergienutzung etwa 500 Prozent (IPCC 2018).⁵ Diese Annahmen stehen im Widerspruch zu den aktuellen Einschätzungen der internationalen Energieagentur (IEA), die davon ausgeht, dass (ohne Laufzeitverlängerungen und Neubauten) der globale Anteil der nuklearen Stromerzeugung deutlich sinkt (IEA 2018). Zwar geht sie davon aus, dass China seine nuklearen Erzeugungskapazitäten ausbaut. Allerdings prognostiziert sie, dass in den Vereinigten Staaten und Europa bis 2040 der Anteil der nuklearen Stromerzeugung von 20 Prozent auf 7 Prozent bzw. von 25 auf 5 Prozent (relativ zum Jahr 2017) sinkt (IEA 2018). Dieses Beispiel unterstreicht neben der Studie von van Vuuren et al. (2018), wie anspruchsvoll einige der sozioökonomischen Annahmen sind, die den Szenarien für die Entwicklung der zukünftigen Emissionen zugrunde liegen, und wie wenig aussagekräftig die Einschätzungen sowohl des verbleibenden CO₂-Budgets als auch der erforderlichen Menge an negativen CO₂-Emissionen ohne die Diskussion dieser Annahmen sind.

⁵ Der Weltklimarat unterscheidet vier Szenariengruppen, P1, P2, P3 und P4. In P1 und P2 wird das 1,5 °C-Ziel ohne temporäre Überschreitung erreicht. Hier wird unterstellt, dass die Treibhausgasemissionen (also CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Emissionen) bis 2030 etwa halbiert werden und bis 2050 auf nahezu netto null sinken (minus 82 bzw. 89 Prozent und minus 93 und 95 Prozent wenn man nur die CO₂-Emissionen betrachtet). In P3 wird das 1,5 °C-Ziel temporär moderat überschritten, in P4 ebenfalls temporär, aber deutlich. In P1 sinkt die Endenergienachfrage bis 2050 um 32 Prozent, in P2 bleibt sie etwa unverändert, in P3 und P4 steigt sie um 21 bzw. 44 Prozent an (IPCC 2018, Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, Abbildung SPM 3.b).

Einschätzungen wie die durch den WBGU (2018) lasen hingegen den Eindruck entstehen, dass NETs eher Teil des Problems als Teil der Lösung sind. Der WBGU warnt vor jedem Optimismus bezüglich ihres Einsatzes. Diese Bedenken werden damit begründet, dass das tatsächliche Potential zahlreicher NETs in der Praxis womöglich deutlich geringer ausfallen wird als bislang angenommen bzw. dass es aufgrund unerwünschter Nebenwirkungen nicht voll ausgeschöpft werden sollte. Terrestrische Ansätze wie die Aufforstung oder die Verwendung der Biomasse für die Elektrizitätsproduktion (bei gleichzeitiger Abscheidung und Einlagerung des dabei entstehenden CO₂, d. h. Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und CO₂-Speicherung, BECCS) können zum Beispiel zusätzlich zur Freisetzung von Nicht-CO₂-Emissionen führen, was wiederum ihre Effektivität reduziert, den globalen Temperaturanstieg abzuschwächen (Wiltshire und Davies-Barnard 2015).⁶ Terrestrische Biomasse-basierte Ansätze treten in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion im Hinblick auf den Flächen- und Wasserverbrauch (Smith et al. 2016). Sowohl terrestrische als auch marine Biomasse-basierte Ansätze greifen in teilweise komplexe biologische Wirkungsketten und Wechselbeziehungen ein und haben damit sowohl negative als auch positive Auswirkungen auf Biodiversität und Ökosysteme (Klepper und Rickels 2014).

Darüber hinaus wird als starkes Argument gegen NETs angeführt, dass durch ihren Einsatz konventionelle Emissionsvermeidung aufgeschoben oder sogar unterlassen wird. Acemoglu und Rafey (2018) zeigen, dass durch negative Emission die globale CO₂-Steuer (als Instrument der Klimapolitik in ihrem Modell) sinkt, wodurch der Anreiz abnimmt, in saubere Technologien zu investieren, was den Übergang in ein CO₂-freies Energiesystem verlangsamt. Allerdings basiert ihre Schlussfolgerung auf der Annahme, dass die politischen Entscheidungsträger eine CO₂-Steuer festlegen, die oberhalb der Pigou-Steuer liegt, um die positiven Forschungsexternalitäten zu internalisieren. Diese Forschungsexternalitäten – also die Übertragung von Wissen („Spillover“) aus der Anwendung neuer Technologien („Learning-by-doing“) auf andere Marktteilnehmer – werden nicht kompensiert, sodass aus gesamtwirtschaftlicher Sicht das öffentliche Gut „neue Erkenntnis“ (durch Forschung und Entwicklung) zu wenig bereitgestellt wird (Jaffe et al. 2005).

⁶ Außerdem beeinflussen Biomasse-basierte Ansätze an Land die Albedo, also die Rückstrahlung einfallenden Sonnenlichts, was ebenfalls ihre Effektivität einschränkt, den globalen Temperaturanstieg zu verringern.

Die Anhebung der CO₂-Steuer ist aber nur ein bedingt geeignetes Instrument, um technologische Übertragungseffekte zu internalisieren. Aufgabe der CO₂-Steuer ist es, durch Emissionen verursachte externe Kosten zu internalisieren – dementsprechend ist sie technologieneutral. Fischer und Newell (2008) sowie Acemoglu et al. (2012) zeigen, dass in einer optimalen Klimapolitik die CO₂-Besteuerung durch eine Forschungsförderung für alternative Technologien komplementiert werden sollte, um einen gesamtwirtschaftlich optimalen Wachstumspfad bei Vorliegen von Externalitäten zu erreichen. Natürlich 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 eine globale CO₂-Steuer oberhalb der optimalen Steuer (das heißt den Grenzschäden entsprechend) angesetzt werden sollte. Quaas et al. (2017) kommen zu dem Ergebnis, dass weder der Anstieg der Wahrscheinlichkeit eines Einsatzes einer Technologie („Slippery-slope argument“) noch die Substitution konventioneller Emissionsvermeidung („Moral-hazard argument“) als Argumente gegen ergebnisoffene Forschung zur Abschätzung des Potentials der Technologien ausreichen. Entscheidend für dieses Ergebnis ist vor allem, dass ergebnisoffene Forschung stattfindet, die auch zeigen kann, dass die untersuchten Technologien nicht zum Einsatz kommen sollten.⁷ Zwar kommt es zu einer partiellen Substitution konventioneller Emissionsvermeidung, wenn die diskutierten Technologien wie erwartet funktionieren. Es kommt allerdings eben auch zu einer Ausweitung der konventionellen Emissionsvermeidung, wenn die Erforschung zeigt, dass die Technologien nicht wie erwartet funktionieren.

Die partielle Substitution (im Fall von funktionierenden NETs) würde sich insbesondere auf sehr teurere Emissionsvermeidung in Sektoren wie der Luftfahrt erstrecken, dabei aber gleichzeitig exogene Temperaturziele mit einer höheren Wahrscheinlichkeit erreichen bzw. im Kontext einer Kosten-Nutzen-Analyse zu einem geringeren Maß des endogenen Klimawandels führen (Obersteiner et al. 2018 bzw. Rickels et al. 2018). Darüber hinaus bieten NETs potentiell strategische Vorteile, da die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen nicht direkt beeinflusst wird und weil gleichzeitig die Anwendung der Technologien keine konzentrierte CO₂-Emissionsquelle erfordert, sondern das

CO₂ direkt der Atmosphäre entnommen wird. Ein Sonderfall ist bei diesen Überlegungen BECCS. Hier werden fossile Brennstoffe substituiert, weil die Entnahme von CO₂ an die Elektrizitätsherstellung gekoppelt ist.

Global nicht abgestimmte, nachfrageseitige Klimapolitiken können über Preiseffekte bei den fossilen Brennstoffen sowie strategischem Verhalten der Anbieter fossiler Brennstoffe zu einer zeitlichen und regionalen Verlagerung der CO₂-Emissionen führen („International carbon leakage“) (Sinn 2008, Hoel 2011, Eichner und Pethig 2011). Neben den Verlagerungseffekten gibt es aber auch Lerneffekte, die den Backstop-Preis⁸ CO₂-freier oder CO₂-armer Energietechnologien und damit auch die optimale Menge zu nutzender fossiler Brennstoffe senken. Inwieweit Technologie-Lerneffekte die Verlagerungseffekte bei global nicht abgestimmten, nachfrageseitigen Klimapolitiken im Hinblick auf die globalen CO₂-Emissionen abschwächen oder sogar übertreffen, ist empirisch offen.

Grundsätzlich bieten NETs die Möglichkeit, diese CO₂-Emissions-Verlagerungseffekte zu umgehen, weil die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen nicht (außer bei BECCS) beeinflusst wird.⁹ Zwar gibt es bislang keine Studien darüber, ob und in welchem Umfang Verlagerungseffekte durch den Einsatz von NETs vermieden werden, aber die Studie von Quirion et al. (2011) bietet einen Anhaltspunkt. Die Autoren untersuchen auf OECD-Länder beschränkte Klimapolitiken und unterscheiden, ob die Technologie Kohlenstoffabspaltung und -speicherung („Carbon Capture and Storage“, CCS) zur Verfügung steht oder nicht. In ihrer modellgestützten Untersuchung sind die fossilen Verlagerungseffekte etwa halb so groß, wenn die Möglichkeit besteht, CCS anzuwenden (weil die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen durch CCS weniger stark sinkt).

Den Verlagerungseffekten bei CO₂-Emissionen stehen Verlagerungseffekte bei Nicht-CO₂-Emissionen gegenüber, die bei terrestrischen biomasse-basierten NETs durch Preiseffekte auf den Märkten für Agrargüter und Landfläche auftreten können. Golub et al. (2013) untersuchen zwar nicht NETs im engeren Sinne, sondern allgemein land-

⁸ Preisobergrenze für fossile Primärenergieträger, die sich aus dem Preis erneuerbarer Energiequellen wie zum Beispiel Sonnenenergie oder nahezu unerschöpfbarer bzw. sehr reichlich vorhandene Fusionbrennstoffe ergibt.

⁹ Unterschiedliche NETs, zum Beispiel die direkte, chemische Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre, erfordern den Einsatz von Energie. Je nach Energiequelle würde damit auch die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen erhöht. Allerdings sinkt damit die Effektivität der betrachteten Technologie erheblich. Der Einsatz fossiler Brennstoffe würde daher die Kombination mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung erfordern.

⁷ Den Begriff Forschung fassen Quaas et al. (2018) sehr weit. Er kann daher so interpretiert werden, dass auch Pilotprojekte und Feldexperimente für die diskutierten Technologien darunter fallen.

basierte Emissionsvermeidung, doch ihre Studie liefert auch eine Einschätzung der im Kontext von Biomassebasierten NETs und Landnutzung potentiell auftretenden Emissions-Verlagerungseffekten. Die Autoren zeigen, dass bei landbasierte Emissionsvermeidung¹⁰, die auf Annex-I-Länder beschränkt ist, Emissions-Verlagerungseffekte durch landwirtschaftliche Intensivierung und durch Ausweitung der landwirtschaftlichen Fläche in Folge von Abholzung in Nicht-Annex-I-Ländern auftreten, sodass die globale Reduktion der Treibhausgasemissionen um etwa 55 Prozent niedriger ist als die lokale Reduktion in Annex-I-Ländern. Wie bereits erwähnt, sind die vermiedenen und zusätzlichen Emissionsverlagerungseffekte bei CO₂-Emissionen und Nicht-CO₂-Emissionen für die verschiedenen (terrestrischen und marinen) NETs bislang aber kaum untersucht oder quantifiziert.

Der Einsatz von NETs (im Gegensatz zu CCS) ist nicht an die Nutzung fossiler Brennstoffe gebunden, weil das CO₂ räumlich und zeitlich unabhängig von der Emissionsquelle der Atmosphäre direkt entzogen wird. Darum erlauben NETs einzelnen Ländern oder einer Koalition der Willigen, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, der über die Reduktion der eigenen CO₂-Emissionen hinausgeht.¹¹ Entsprechend könnte zum Beispiel ein Land ohne fossile Energieerzeugung wie Norwegen effektiv die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre reduzieren. Damit ließe sich zwar nicht das Trittbrettfahrerproblem in der internationalen Klimapolitik lösen. Doch man könnte ohne Aktivität und Kooperation großer Emittenten (theoretisch) sowohl ambitionierten Klimaschutz erreichen als auch eine (langfristige) Festlegung auf die Nutzung fossiler Brennstoffe (wie im Fall von CCS) vermeiden. Die strategischen Möglichkeiten, NETs zu einzusetzen (und die Sonderrolle von BECCS), um die negativen Folgen imperfekter (d. h. global nicht koordinierter und nicht-kooperativer) Klimapolitiken abzuschwächen, sind wie bereits angesprochen nicht nur kaum erforscht, sondern sie finden sich ebenfalls nicht in der klimapolitischen Bewertung dieser Technologien des Weltklimarats wieder.

¹⁰ Anreize zur CO₂-Sequestrierung in der Forstwirtschaft und Besteuerung emittierender Sektoren inklusive der Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft.

¹¹ Statt des Einsatzes von NETs, um das CO₂ nachträglich der Atmosphäre zu entziehen, gibt es auch die Möglichkeit, das Angebot an fossilen Brennstoffen zu verknappen, um damit vorgelagert die möglichen Emissionen von CO₂ zu reduzieren. Harstadt (2012) zeigt, dass durch den Erwerb fossiler Reserven und durch deren Stilllegung auch unilateral eine effektive Klimapolitik möglich ist. Allerdings steht diesem Ansatz in der Praxis die Schwierigkeit gegenüber, (durchsetzbare) Eigentumsrechte an fossilen Reserven im Einflussbereich anderer Staaten zu erwerben.

Den möglichen strategischen Vorteilen global nicht-koordinierter Klimapolitiken und dem Beitrag zur Einhaltung des 1,5 °C-Ziels könnte aber die Ablehnung der Technologien in der Bevölkerung entgegenstehen. In ihrer Bestimmung der sozioökonomischen Untergrenze der Menge an negativen Emissionen nehmen van Vuuren et al. (2018) an, dass diese durch umfassende Aufforstung erreicht würde. Das Aufforsten, also das Pflanzen von Bäumen, wird in der Bevölkerung als gute Methode wahrgenommen und stößt kaum auf Ressentiments (17 Prozent Ablehnung), wohingegen CCS mit Speicherung im Meeresgrund auf sehr viel mehr Ablehnung (43 Prozent) stößt (Braun et al. 2018). Das CO₂-Aufnahmepotential von Aufforstung ist im Vergleich zu anderen NETs aber gering (EASAC 2018), besonders wenn man berücksichtigt, dass die verwendeten Flächen dann nicht mehr für die Lebensmittelproduktion zur Verfügung stehen. Zudem ist der zurzeit eingeschlagene Emissionspfad weit entfernt von den optimistischen Annahmen in der Modellanalyse von van Vuuren et al. (2018) über die Transformation hin zu einer emissionsarmen Wirtschaft. Bei einer realistischeren Betrachtung zukünftiger Emissionspfade wird Aufforstung allein nicht ausreichen, um ambitionierte Klimaschutzziele zu erreichen. Auch weniger populäre NETs müssen in Betracht gezogen werden. Die Potentialabschätzungen für BECCS zum Beispiel sind höher, und die Technologie könnte in einem Portfolio aus NETs einen substantiellen Beitrag leisten.

In einem Bürgerforum zu BECCS in Deutschland wurde deutlich, dass die Teilnehmer wegen der negativen Wechselwirkungen mit der Nahrungsmittelproduktion und der Biodiversität sowie aufgrund von Bedenken bezüglich der Speichersicherheit andere als harmloser wahrgenommene NETs wie zum Beispiel eine verbesserte Verwitterung vorziehen würden (Bürgerforum Climate Engineering 2018). Diese Bedenken zeigen sich nicht nur im kleinen Rahmen. In Deutschland gab es in der Vergangenheit bereits öffentliche Proteste gegen ein Forschungsprojekt zur Ozeandüngung, die zum Aufschub der Experimente führten (Oschlies und Klepper 2017), sowie gegen CCS-Demonstrationsprojekte (Dütschke, Schumann und Pietzner 2015). Politisch haben die Proteste gegen CCS dazu beigetragen, dass die Speicherung von CO₂ in Deutschland in den Bundesländern, in denen die geologischen Grundvoraussetzungen gegeben wären (Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein), nunmehr rechtlich ausgeschlossen ist.

Insgesamt zeigen diese Überlegungen, dass NETs zwar ein wichtiger Bestandteil zukünftiger Klimapolitiken sein müssen, wenn ein ambitionierter Klimaschutz realisiert werden soll, dass gleichzeitig aber noch unklar ist, welche

NETs in welchem Umfang Bestandteil der zukünftigen Klimapolitiken sein werden. Allerdings kann man davon ausgehen, dass die Verwendung eines Portfolios verschiedener NETs im Vergleich zum umfassenden Einsatz einer einzelnen oder einiger weniger Technologien als leichter in die Praxis umsetzbar wie auch als nachhaltiger eingeschätzt wird (IPCC 2018). Die derzeit 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 BECCS. Sie spiegeln weder die Palette der diskutierten potenziellen NETs noch Portfolios und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen NETs (IPCC 2018).

4 Die Entwicklung von NETs

Die Größenordnungen des Einsatzes von NETs in naturwissenschaftlichen Modellierungen und die Entwicklung und Erprobung der Technologien stehen in starkem Kontrast. In Szenarien zur Aufforstung beziehungsweise zur Alkalinisierung des Ozeans wird unterstellt, dass das gesamte australische Hinterland bepflanzt beziehungsweise Silikatgestein in Größenordnung der globalen Steinkohleindustrie abgebaut wird (Keller et al. 2014). Derartige Projekte könnten sicherlich nur auf staatlicher Ebene koordiniert und durchgeführt werden. Dem steht eine dezentrale, unter anderem durch staatliche Förderung initiierte oder unterstützte Entwicklung kleiner NETs-(Pilot) Projekte durch Unternehmen und/oder Universitäten und Forschungsinstituten gegenüber.

So gibt es zum Beispiel bereits einige junge Unternehmen, die die Entwicklung des chemischen Herausfilterns von CO₂ aus der Luft („Direct-Air-Capture“, DAC) vorantreiben. Neben dem amerikanischen Unternehmen Global Thermostat und dem kanadischen Unternehmen Carbon Engineering betreibt das Schweizer Unternehmen Climevents 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, entsprechende Anlagen in der Nähe geeigneter Lagerstätten oder in der Nähe CO₂-freier Energiequellen aufzustellen, die nicht oder nur schwer ins Stromnetz einzubinden sind (Rickels et al. 2011). Diese Idee wird im Demonstrationsprojekt CarbFix auf Island aufgegriffen. Dabei wird das energieintensive DAC-Verfahren mit erneuerbaren Energien aus Geothermie betrieben und das eingefangene CO₂ in dem vorhandenen porösen Basaltgestein eingelagert. Dort mineralisiert das CO₂ zu Karbo-

nat und wird praktisch permanent gespeichert (Matter et al. 2016). An dem Projekt sind neben Climevents staatliche Energieversorger aus Island sowie Forschungseinrichtungen und Universitäten beteiligt. Gefördert wird das Projekt unter anderem durch das Forschungs- und Entwicklungsprogramm Horizon 2020 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). Keith et al. (2018) schätzen, dass die ursprünglich als sehr teuer eingeschätzte Technologie (mehr als 600 Dollar je Tonne CO₂) tatsächlich zu Kosten unter 100 Dollar je Tonne CO₂ einsetzbar sein wird.

Ähnliche Entwicklungen gibt es bei der Anwendung von BECCS. Insbesondere in Schweden wird in unterschiedlichen Pilotprojekten untersucht, inwieweit bei der Papierherstellung oder in der Ethanolproduktion abgedichtetes CO₂ in salinen Aquiferen eingelagert werden kann. In Großbritannien untersuchen die Unternehmen Drax Power Stations und C-Capture in einem Pilotprojekt seit Ende 2018, wie die Biomasse-basierte Elektrizitätserzeugung in der Praxis durch CCS ergänzt werden kann. Andere Ideen, die dezentral entwickelt werden und flexible Möglichkeiten bieten, CO₂ zu speichern, fokussieren darauf, Biomasse verstärkt im Bauwesen einzusetzen. Hier wird untersucht, wie schnell wachsende Weichhölzer behandelt werden müssen, damit sie als Baumaterial verwendet werden können (The Royal Society 2018).

Die unterschiedlichen Ansätze und Projekte haben gemeinsam, dass sie im Umfang, zu dem sie CO₂ aus der Atmosphäre zu ziehen vermögen, noch sehr weit davon entfernt sind, einen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Sehr wohl können diese Technologien aber bereits in der mittelbaren Zukunft ein wichtiges Element länderspezifischer Netto-Null-Strategien sein. Effektiver Klimaschutz setzt zwar voraus, dass es global zu einer Reduktion der Treibhausgas- und insbesondere CO₂-Emissionen kommt. Allerdings haben sich einige amerikanische Bundesstaaten (Hawaii und Kalifornien) sowie Schweden Netto-Null-CO₂-Emissionen als Ziel für etwa die Mitte des Jahrhunderts gesetzt. Großbritannien, Neuseeland und die Europäische Union diskutieren über dieses Ziel. Entsprechend werden in diesen Ländern NETs ein wichtiger Bestandteil sein, um Residualemissionen zum Beispiel aus dem Straßenverkehrs- oder Luftfahrtsektor zu neutralisieren.

Die genannten Technologien und Ansätze haben aber auch gemein, dass es sich dabei in der Regel um staatlich unterstützte Forschungs- und Pilotprojekte handelt, die derzeit noch nicht wirtschaftlich rentabel sind und in ihrer

Entwicklung weiterer Förderung bedürfen. Grundsätzlich setzen NETs voraus, dass sich durch die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre (oder die Einsparung der CO₂-Emission) ein (zusätzlicher) Erlös generieren lässt, das heißt, dass CO₂-Emissionen einen Preis haben.¹² Laut der Weltbank (2018) gibt es 51 bereits implementierte oder angekündigte regionale, nationale und sub-nationale CO₂-Preis-Systeme (entweder durch eine Steuer oder ein Emissionshandelssystem), die von 2020 an etwa 20 Prozent der globalen CO₂-Emissionen abdecken würden. Das europäische Emissionshandelssystem deckt (derzeit noch) die meisten davon ab. Die höchsten CO₂-Preise werden allerdings außerhalb des EU-ETS durch Steuern gesetzt, insbesondere in Schweden (139 Euro je Tonne), in der Schweiz und Liechtenstein (101 Euro je Tonne), in Norwegen (64 Euro je Tonne) oder auch in Frankreich (55 Euro je Tonne) (Weltbank und Ecofys 2018).¹³

Nicht überraschend ist daher, dass es insbesondere in Schweden zahlreiche Pilotprojekte zu NET gibt. Die selektive Beschreibung unterschiedlicher NETs-Pilotprojekte zeigt aber auch, dass es eben zusätzlicher Förderung bedarf, um diese Technologien zu entwickeln. Das liegt zum einen daran, dass noch unklar ist, wie Technologien, die „nur“ CO₂ aus der Atmosphäre entziehen (und nicht gleichzeitig Elektrizität oder Kraftstoffe CO₂-neutral produzieren), am Emissionshandel oder der CO₂-Besteuerung (im Sinne von Gutschriften) partizipieren können. Zum anderen geht mit dem Markteintritt dieser (und anderer) Technologien ein Fixkostenproblem einher, das je nach Höhe weiterer Instrumente bedarf, damit man eine gesamtwirtschaftliche optimale Entwicklung erreicht.

Antoniou und Strausz (2017) zeigen (für den Fall von erneuerbaren Energien) in einem transparenten Modellrahmen, dass eine CO₂-Steuer (oder äquivalente Subvention CO₂-freier Energie) nicht ausreichend ist, um das gesamtwirtschaftliche Optimum zu erreichen, wenn die fixen Eintrittskosten hoch sind. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass eine optimale Technologieentwicklung neben einem CO₂-Preis, der den marginalen externen Kosten entspricht, eine fixe Pauschalförderung erfordert, die die Markteintrittskosten reduziert. Damit bestätigen sie frühere Ergeb-

nisse wie von Acemoglu et al. (2012), dass für eine optimale Technologieentwicklung eine zusätzliche Förderung neben der Bepreisung der Externalität notwendig ist. Acemoglu et al. begründen ihre Ergebnisse insbesondere mit der Notwendigkeit zusätzlicher Forschungsübertragungseffekte. Antoniou und Strausz (2017) leiten ihre Ergebnisse allgemein für das Problem erhöhter fixer Markteintrittskosten ab (die sich zum Beispiel aus dem erhöhten Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei erneuerbaren Energien oder eben auch bei NETs ergeben).

Antoniou und Strausz (2017) betrachten allerdings die fixen Markteintrittskosten unabhängig von der Ausgestaltung des Instruments zur CO₂-Bepreisung. Bahr et al. (2012) sowie Mazzucato und Semieniuk (2017) zeigen (ebenfalls für den Fall erneuerbarer Energien), dass die Markteintrittskosten stark durch die Finanzierungskosten beeinflusst sind. Bei variabler Vergütung (die sich unter dem „Renewable portfolio standard“ (RPS) im Gegensatz zu fester Einspeisevergütung ergibt) erhöhen sich die Finanzierungskosten, so dass Technologien mit hohem Kapitalbedarf schwieriger (bzw. mit entsprechendem Risikoaufschlag) zu finanzieren sind. Mazzucato und Semieniuk zeigen, dass die Finanzierungsstruktur und Risikopräferenzen erheblichen Einfluss auf die Zusammensetzung der Investmentportfolios und damit auf die Richtung der Technologieentwicklung haben.

Die Forschungsförderung von NETs sollte daher neben dem marginalen Anreiz für den Umfang der Anwendung durch den CO₂-Preis das Problem der fixen Markteintrittskosten reduzieren. Dabei ist zu bedenken, dass sich in einem CO₂-Emissionshandelssystem im Vergleich zu einer CO₂-Steuer durch die höhere Variabilität der Cashflows höhere Finanzierungskosten und dementsprechend höhere Markteintrittskosten ergeben. Staatliche Kreditprogramme (bzw. staatliche Ausfallbürgschaften) bilden daher ein wichtiges Element, um den Markteintritt zu erleichtern und einen gesamtwirtschaftlich optimalen Anteil an NETs zu erreichen. Grundsätzlich gilt dabei aber, wie auch für die Förderung erneuerbarer Energien oder alternativer Antriebstechnologien im Verkehrssektor, dass die frühzeitige Festlegung auf bestimmte Technologien zu vermeiden ist und dass der Erfolg der Förderprogramme nicht anhand der Entwicklung von Vorzeigeprojekten, sondern anhand der Entwicklung des Projektportfolios zu beurteilen ist (Rodrik 2014). Sobald eine Marktintegration der verschiedenen NETs erreicht ist, würde der resultierende CO₂-Preis den Umfang der negativen Emissionen sowie das Ausmaß der Substitution herkömmlicher Emissionsvermeidung bestimmen.

Allerdings erfordert eine Marktintegration von NETs die Entwicklung von Metriken, damit man sowohl die

¹² Die Nachfrage nach CO₂ von Gewächshäusern oder aus der Industrie (zum Beispiel zur Getränke-Karbonisierung) ist bei weitem nicht ausreichend, um ein entsprechendes CO₂-Preissignal zu setzen.

¹³ Die CO₂-Steuern gelten dann für die Emissionen außerhalb des EU-ETS, bzw. sind mit dem EU-ETS kombiniert. Großbritannien erhebt eine zusätzliche CO₂-Steuer für Unternehmen im EU-ETS, wenn der Zertifikatspreis unter eine definierte Untergrenze fällt („UK price floor“). Die Höhe der Steuer ergibt sich als Differenz zwischen Untergrenze und Zertifikatspreis.

verschiedenen NETs miteinander als auch mit der Emissionsvermeidung vergleichen kann. Die Tabelle A1 im Anhang suggeriert zwar einen Vergleich zwischen den verschiedenen Technologien bezüglich Potential und Kosten, allerdings ist diese Vergleichbarkeit noch nicht gegeben. In dem Maße, wie Technologien die Albedo der Erde beeinflussen beziehungsweise durch biologische Prozesse Nicht-CO₂-Treibhausgase freisetzen, bei der Bearbeitung und Ausbringung von Materialien Energie benötigen oder eben Elektrizität erzeugen, verändert sich ihre Effektivität und damit ihre Effizienz. Außerdem variieren die verschiedenen NETs im Gesamtumfang ihrer Fähigkeit, CO₂ einzulagern. Insbesondere bei Maßnahmen zur Erhöhung der Kohlenstoffspeicherung zum Beispiel in Böden oder Mooregebieten erwartet man in 10-20 Jahren eine Sättigung der CO₂-Aufnahme (Royal Society 2018).

5 Eine unbequeme Wahrheit

Der Sonderbericht des Weltklimarats über die mögliche Begrenzung des anthropogenen Klimawandels auf 1,5 °C (IPCC 2018) bietet eine umfassende Zusammenfassung und Erklärung des derzeitigen Wissenstandes über die Herausforderungen, das ambitionierte Temperaturziel zu erreichen. Das verbleibende CO₂-Budget ist dabei eine wichtige Kennzahl. Der intensive Begutachtungsprozess sowie der damit verbundene wissenschaftliche Qualitätsstandard gewährleisten, dass die Schätzungen des Weltklimarats für diese Kennzahl als die (derzeit) verlässlichsten betrachtet werden kann. Allerdings bietet diese naturwissenschaftliche Kennzahl nur dann verwertbare Informationen für die Klimapolitik, wenn gleichzeitig über den Einfluss unterschiedlicher Bestimmungsfaktoren, Definitionen und unterstellter sozioökonomischer Veränderungen transparent diskutiert wird (Peters 2018).

Der Bericht des Weltklimarats, die veröffentlichten Anhänge zu den einzelnen Kapiteln sowie die zugehörige Szenario-Datenbank (Huppmann et al. 2018) bieten die erforderlichen Informationen, um die angewandten Methoden und Szenarien nachzuvollziehen und einzuordnen. 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 und Vertreter von Nicht-Regierungsorganisationen die Ausweitung des CO₂-Budgets (im Vergleich zum fünften Sachstandsbericht) interpretieren. Die Rolle von NETs für die Erreichung des Temperaturziels

herunterzuspielen, führt nicht zu verantwortungsvollen oder vorausschauenden Einschätzungen der Herausforderung für Forschung und Klimapolitik: Wir müssen jetzt die Grenzen und Auswirkungen der verschiedenen NETs und ihre Wechselwirkungen verstehen, wenn die von uns angestrebten Minderungspfade realistisch sein sollen. Dazu gehört sowohl, ihre strategischen Implikationen in global nicht-koordinierten und nicht-kooperativen Klimapolitiken zu verstehen, als auch, die Wahrnehmung und Akzeptanz der verschiedenen NETs in der Bevölkerung zu berücksichtigen und zu verbessern. Zudem gilt es die Integration von NETs in CO₂-Handelssysteme oder CO₂-Steuerregime zu fördern. Erste Ansätze sind hier bereits zu erkennen: Mit der Verordnung zur Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Verordnung (EU) 2018/841) werden im Vergleich zu den Regelungen im Rahmen des Kyoto Protokolls 2013 (529/2013/EU) die Anrechnungs- und Verbuchungsmethoden verbessert, der Geltungsbereich wird auf alle Landnutzungsformen ausgeweitet, und ein Überwachungssystem wird eingeführt. Die EU-Lastenverteilungsregelung (Effort sharing legislation) erlaubt den zwischenstaatlichen Handel mit den jährlichen Emissionsrechten, wenn Staaten es schaffen, (auch) mithilfe ihrer Senken ihre Reduktionsziele zu übererfüllen. Hier geht in der Verordnung nicht an sich um NETs, aber das entstehende Bemessungs- und Kontrollsystem könnte langfristig auf alle NETs ausgeweitet werden. Diese langsamen, aber kontinuierlichen Fortschritte bei der Bemessung des Beitrags von Landnutzungsemissionen und Senken könnte man so interpretieren, dass für eine Marktintegration von NETs zwar noch zahlreiche Regulierungshürden überwunden werden müssen, aber gleichzeitig nur diejenigen NETs diese Hürden überwinden werden, deren Wirkungsweise klar verstanden ist und deren Nettobeitrag somit ausreichend genau bemessen werden kann.

Vor diesem Hintergrund kann man die Betonung der Dringlichkeit umfassender Forschung der amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2018) sowie der britischen Royal Society and Academy of Engineering nur begrüßen. Ein breit angelegtes, technologieoffenes Forschungsprogramm, wie es derzeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geprüft wird, wäre daher ein wichtiger Schritt für zukunftsweisenden, effektiven internationalen Klimaschutz. Warum allerdings nicht gleichzeitig die dezentrale Entwicklung von NET-(Pilot) Projekten in kleinem Maßstab durch Unternehmen und/oder Universitäten und Forschungsinstituten stärker berücksichtigt wird, ist schwer nachvoll-

ziehbar. Auf die kleine Anfrage (19/6737) von Vertretern der FDP-Bundestagsfraktion zum Status quo negativer Emissionen und der Förderung von CO₂-Entnahmetechnologien antwortete die Bundesregierung, dass sie derzeit weder (marktwirtschaftliche) Konzepte zur Entwicklung der technischen CO₂-Entnahme noch Projekte fördere, die die Forschung zu und Verwendung von technischen CO₂-Entnahmetechnologien in Entwicklungs- und Schwellenländern zum Ziel haben.

Gemessen an den ungeklärten Potenzialen und Risiken, kann man diese Zurückhaltung zwar teilweise nachvollziehen. Gemessen an der Dringlichkeit dieser Technologien für ambitionierten Klimaschutz sowie deren Bedeutung in global nicht-koordinierten Klimapolitiken, kann man die Zurückhaltung aber nicht als problemorientierten Klimaschutz bewerten. Die Forschungsförderung für NETs sollte neben dem marginalen Anreiz für den Umfang der Anwendung durch den CO₂-Preis das Problem der fixen Markteintrittskosten reduzieren. Staatliche Kreditprogramme (bzw. staatliche Ausfallbürgschaften) sowie ganz grundsätzlich ein Ausbau des deutschen und europäischen Marktes für Wagniskapital sind daher ein wichtiges Element, um ausgehend von einer starken Grundlagenforschung die kommerzielle Anwendung neuer (negativer Emissions-)Technologien zu fördern.

Grundsätzlich gilt dabei, wie auch für die Förderung erneuerbarer Energien oder alternativer Antriebstechnologien im Verkehrssektor, dass die frühzeitige Festlegung auf bestimmte Technologien zu vermeiden ist und dass der Erfolg der Förderprogramme nicht anhand der Entwicklung von Vorzeigeprojekten, sondern anhand der Entwicklung des Projektportfolios zu beurteilen ist. Sobald eine Marktintegration der verschiedenen NETs erreicht ist, würde der resultierende CO₂-Preis den Umfang der negativen Emissionen sowie das Ausmaß der Substitution herkömmlicher Emissionsvermeidung bestimmen. Dies erfordert die Entwicklung geeigneter Metriken, damit man den tatsächlichen Beitrag der Technologien zur Reduzierung der globalen Erwärmung angemessen mit der Emissionsvermeidung vergleichen kann.

Literaturverzeichnis

- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Bursztyń 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 24411, National Bureau of Economic Research Working Paper Series, online verfügbar unter <http://www.nber.org/papers/w24411> (abgerufen am 21.11.2018).
- Allen, M. R. et al. (2009), Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne, *Nature* 458, S. 1163–66.
- Antoniou, F. und R. Strausz (2017), Feed-in subsidies, taxation, and inefficient entry, *Environmental and Resource Economics* 67(4), S. 925–40.
- Bahr, G., D. Narita und W. Rickels (2012), Recent developments in European support systems for renewable power, Kiel Policy Brief 53, Institut für Weltwirtschaft.
- 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.
- Bürgerforum Climate Engineering (2018), Bürgergutachten zum Bürgerforum „Climate Engineering – eine Möglichkeit gegen den Klimawandel?“, online verfügbar unter www.spp-climate-engineering.de/buergerforum.html?file=files/ce-projekt/media/download_PDFs/BF-Gutachten.pdf (abgerufen am 18.01.2019)
- EASAC – European Academies Science Advisory Council (2018), Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets?, EASAC Secretariat, Halle an der Saale.
- Eichner, T. und R. Pethig (2011), Carbon leakage, the green paradox and perfect future markets, *International Economic Review* 52(3), S. 767–805.
- Dütschke, E., D. Schumann und K. Pietzner (2015), Chances for and limitations of acceptance for CCS in Germany, in: A. Liebscher und U. Münch (Hrsg.), *Geological Storage of CO₂ – Long Term Security Aspects*, Cham, Springer International, S. 229–45.
- 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.
- Gasser, T. et al. (2018), Path-dependent reductions in CO₂ emission budgets caused by permafrost carbon release, *Nature Geoscience* 11, S. 830–835.
- Geden, O. und A. Löschel (2017), Define limits for temperature overshoot targets, *Nature Geoscience* 10(12), S. 881–82.
- Golub, A. A. et al. (2013), Global climate policy impacts on livestock, land use, livelihoods, and food security, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(52), S. 20894–99.
- Harstad, B. (2012), Buy coal! A case for supply-side environmental policy, *Journal of Political Economy* 120(1), S. 77–115.
- Hausfather, Z. (2018a), Analysis: Why the IPCC 1.5C report expanded the carbon budget, Carbon Brief, online verfügbar unter <https://www.carbonbrief.org/analysis-why-the-ipcc-1-5c-report-expanded-the-carbon-budget>, (abgerufen am 21.10.2018)
- Hausfather, Z. (2018b), Analysis: How much ‘carbon budget’ is left to limit global warming to 1.5 °C, Carbon Brief, online verfügbar unter <https://www.carbonbrief.org/analysis-how-much-carbon-budget-is-left-to-limit-global-warming-to-1-5c> (abgerufen am 21.10.2018).
- Held, H., E. Kriegler, K. Lessmann und O. Edenhofer (2009), Efficient climate policies under technology and climate uncertainty, *Energy Economics* 31, S. 50–61.
- Hoel, M., (2011), The supply side of CO₂ with country heterogeneity, *The Scandinavian Journal of Economics* 113(4), S. 846–65.
- Huppmann, D. et al. (2018), IAMC 1.5 °C scenario explorer and data hosted by IIASA, hrsg. vom Integrated Assessment Modeling Consortium & International Institute for Applied Systems Analysis.
- IEA (International Energy Agency) (2018), *World Energy Outlook 2018*, Paris.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2018): Summary for policymakers, in: V. Masson-Delmotte et al. (Hrsg.), 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.
- Jaffe, A. B., R. G. Newell, R. N. Stavins und N. Robert (2005), A tale of two market failures, Technology and environmental policy, *Ecological Economics* 54(2), S. 164–74.
- Keith, D. W., G. Holmes, D. St. Angelo und K. Heidel (2018), A process for capturing CO₂ from the atmosphere, *Joule* 2(8), S. 1573–94.
- Keller, D. P., E. Y. Feng und A. Oschlies (2014), Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon-dioxide emission scenario, *Nature Communications* 5 (3304), doi.org/10.1038/ncomms4304
- 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, hrsg. von United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC, online verfügbar unter https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (abgerufen am 17.11.2018).
- Kriegler, E 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 und 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. 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, S. 652–55.
- Mazzucato, M. und G. Semieniuk (2018), Financing renewable energy: Who is financing what and why it matters, *Technological Forecasting and Social Change* 127, S. 8–22.
- 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. (2019), *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington, The National Academies Press, 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. 1315–19.
- Obersteiner, M. 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*, Paris.
- Peters, G. P. (2018), Beyond carbon budgets, *Nature Geoscience* 11, S. 378–80.
- Oschlies, A. und G. Klepper (2017), Research for assessment, not deployment, of climate engineering: The German Research Foundation’s priority program SPP 1689, *Earth’s Future* 5(1), S. 128–34.
- Quaas, M. F., J. Quaas, W. Rickels und 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.
- Quirion, P. et al. (2011), How CO₂ capture and storage can mitigate carbon leakage. *FEEM Working Paper* Nr. 15.2011.
- Rickels, W. 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, online verfügbar unter https://www.kiel-earth-institute.de/sondierungsstudie-climate-engineering.html?file=files/media/downloads/CE_gesamtstudie.pdf (abgerufen am 21.11.2018).
- Rickels, W., F. Reith, D. Keller, A. Oschlies und M. F. Quaas (2018), Integrated assessment of carbon dioxide removal, *Earth’s Future* 6(3), S. 565–82.
- Schmidt, M. G. W., A. Lorenz, H. Held und E. Kriegler (2011), Climate targets under uncertainty: Challenges and remedies, *Climatic Change* 104(3–4), S. 783–91.
- Schuur, E. A. G. et al. (2015), Climate change and the permafrost carbon feedback, *Nature* 520, S. 171–79.
- Seneviratne, S. I. et al. (2018), The many possible climates from the Paris Agreement’s aim of 1.5 °C warming, *Nature* 558 (7708), S. 41–49.
- Sinn, H. W. (2008), Public policies against global warming: A supply side approach, *International Tax and Public Finance* 15, S. 360–94.
- Smith, P. et al. (2014), Agriculture, forestry and other land use (AFO-LU), in: O. Edenhofer et al. (Hrsg.), *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.
- Smith, P. et al. (2016), Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions, *Nature Climate Change* 6, S. 42–50.
- Springmann, M. et al. (2017), Mitigation potential and global health impacts from emissions pricing of food commodities, *Nature Climate Change* 7, 69–74.
- Strefler, J. et al. (2018), Between Scylla and Charybdis, Delayed mitigation narrows the passage between large-scale CDR and high costs, *Environmental Research Letters* 13(4), 44015.
- The Royal Society (2018), *Greenhouse Gas Removal*, London.
- Vuuren, D. P. van 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.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung) (2018), Zeitgerechte Klimapolitik: Vier Initiativen für Fairness, Politikpapier Nr. 9.
- Weltbank und Ecofys (2018), *State and Trends of Carbon Pricing 2018*, Weltbank, Washington.
- Wiltshire, A. und T. Davies-Barnard (2015), Planetary limits to BECCS negative emissions, AVOID2, 1104872/AVOID2 WPD.2 a Report 1.
- 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. et al. (2016), Reducing emissions from agriculture to meet the 2 °C target, *Global Change Biologie* 22(12), S. 3859–64.

Anhang

Die Tabelle 1 bietet einen Überblick über derzeit diskutierte NETs und stützt sich im Wesentlichen auf die Tabelle 2 auf Seite 67 im Bericht der Royal Society (2018). Die Royal Society führt nicht explizit die marine Biomassegewinnung (*Blue Carbon*) auf, die diesbezüglichen

Einträge sind daher dem Bericht der National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) entnommen. Dieser Bericht dient auch als Grundlage für die Potentialabschätzung bei der mineralischen Karbonatbildung. Die Zahlen in der Tabelle basieren auf unterschiedlichen Studien und sind daher nur bedingt vergleichbar.

Tabelle 1: Übersicht über unterschiedliche Negative Emissionstechnologien

Negative Emissionstechnologie (NET)	Globales Potential (Gt CO ₂ /Jahr)	Kosten (Dollar/tCO ₂)	Reife der Technologie (1 bis 9) ^a
NETs basierend auf biologischen Verfahren			
Aufforstung/Wiederaufforstung	3-20	3-30	8-9
Waldmanagement	1-2	3-30	8-9
Feucht-, Moor- und Küstengebiets-Erhaltung, -Wiederherstellung und -Management	0,4 – 20	10-100	5-6
Kohlenstoffspeicherung in Böden	1-10	-10– 3	8-9
Biokohleherstellung	2-5	0-200	3-6
Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS)	10	100-300	Bioenergie: 7-9 CCS: 4-7
Verwendung von Biomasse als Baumaterial	0,5-1	0	8-9
Blue Carbon ^b	0,13	0-20	NA
Marine (Eisen-)Düngung	1-3	10-500	1-5
NETs basierend auf chemischen Verfahren			
Beschleunigung der natürlichen Verwitterung	0,5-4	50-500	1-5
Mineralische Karbonatbildung	9,13-10,83 ^b	50-300 (ex situ) 20 (in situ)	3-8
Marines Alkalinitätsmanagement	40	70-200	2-4
NETs basierend auf chemisch-technischen Verfahren			
CO ₂ -Absorption aus der Luft (Direct air capture)	0,5-5	200-600 (kurzfristig) 100 (langfristig)	4-7 ^c
Kohlenstoffarmer Zement	>0.1	50-300	6-7

^a Die Technologiereife (Technology readiness level, TRL) wird von der Royal Society in 9 Stufen eingeteilt. TRL1: grundsätzliche Prinzipien verstanden (Basic principle); TRL2: Forschung und Entwicklung (invention and research); TRL3: Machbarkeitsstudien (Proof of concept); TRL4: Laborversuche- und -experimente (Bench scale research); TRL5: Pilotversuche (Pilot scale); TRL6: umfassende Dauerversuche (Large scale); TRL7: nicht-erwerbliche/nicht profitable Inbetriebnahme (Inactive commissioning); TRL8: erwerbliche/profitable Inbetriebnahme (Active commissioning); TRL9: Dauerbetrieb (Operations).

^b Die Zahlen basieren auf National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019).