

Falsche Hoffnungen, vertane Chancen

Wie ökonomische Modelle die Vorschläge des IPCC im Special Report 15 „Global Warming of 1.5 °C“ (2018) beeinträchtigen

Eine Analyse aus dem wissenschaftlichen Beirat des BUND

Joachim H. Spangenberg, Werner Neumann, Heinz Klöser, Stefan Wittig, Tilmann Uhlenhaut, Martha Mertens, Edo Günther, Ingo Valentin, Markus Große Ophoff 2020.

Falsche Hoffnungen, vertane Chancen: Wie ökonomische Modelle die Vorschläge des IPCC im Special Report 15 „Global Warming of 1.5 °C“ (2018) beeinträchtigen. Eine Analyse aus dem wissenschaftlichen Beirat des BUND. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland /Friends of the Earth Germany, Berlin.

Alle Autor*innen sind Sprecher*innen von Bundesarbeitskreisen im wissenschaftlichen Beirat des BUND und haben ihre Beiträge in dieser Funktion verfasst. Sie erklären dass sie an dem IPCC SR15 Bericht nicht mitgewirkt haben und bei Ihnen keine Interessenkonflikte vorliegen.

1. Einleitung: Herausforderung Klimamodellierung

Das Klimasystem ist ein komplexes, dynamisches System das sich nicht in einem Gleichgewicht befindet, sondern ein dynamisch veränderliches dissipatives Muster fern des Gleichgewichts bildet, das durch permanenten Energie- und Materialdurchsatz aufrechterhalten wird (Prigogine 1997). Weil es physikalischen Gesetzen folgt, ist seine Entwicklung im Prinzip prognostizierbar (Bar-Yam 1997), allerdings aufgrund der Komplexität des Systems mit den inhärenten Unsicherheitsmomenten nicht exakt, sondern mit Spannbreiten unter Angabe von ordinalen Wahrscheinlichkeitsklassen.¹

Diese vergleichsweise sichere Situation endet, wenn menschliche Entscheidungen in Politik, Wirtschaft und Konsum mit in den Blick genommen werden. Aufgrund des nur schwach regelgebundenen, antizipierenden Verhaltens der Akteure sind längerfristige Prognosen unmöglich und plausible Szenarien auf 20 bis 30 Jahre maximal begrenzt (Allen 1998; Bossel 2000), wie sie evolutionäre, systemdynamische oder agentenbasierte Modelle liefern können, nicht aber die in den integrierten Modellen der Klimaforschung (Integrated Assessment Models IAM) überwiegend verwandten Gleichgewichtsmodelle (Spangenberg, Polotzek 2019).

Der Bericht betrachtet zwei Arten von Entwicklungspfaden als mit dem 1,5°-Ziel konsistent: diejenigen, die die Klimaerwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/2 oder 2/3 auf maximal 1,5°C beschränken und solche, die zwar den Zielwert überschreiten, aber in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts durch „negative Emissionen“ die Erwärmung auf 1,5° zurückführen.

Die zweite Gruppe kann jedoch u.E. nicht als geeignete Grundlage für eine erfolgreiche Klimapolitik betrachtet werden, weil die ökologischen Folgen selbst bei einer stetigen Entwicklung fatal sein können (Su et al. 2018; Wiens 2016). Bei solchen graduellen Änderungen wird es aber nicht bleiben, denn das Überschreiten der 1,5° Schwelle erhöht die Wahr-

scheinlichkeit, dass jenseits von Kippunkten irreversible Degradationsprozesse in Gang gesetzt werden (Steffen et al. 2018, IPCC 2018). Das gilt für die Polarregionen, wie aktuelle Beobachtungen von Methanauflösung im küstennahen Nordozean zeigen, ebenso wie die Eisschmelze in Grönland (2019 wie von Modellen für 2070 prognostiziert), die Waldbrände nördlich des Polarkreises mit Klimaeffekten des brennenden Moorbodens, gegen die die Methanemissionen aus tauenden Permafrostböden vergleichsweise marginal sind und die bei weiterer Erwärmung nicht aufzuhalten sind, der tauende Permafrostboden in Alaska (örtlich 2019 wie für 2090 erwartet), und die Eisverluste der Antarktis (Shepherd et al. 2019)². Gegenwärtige und nahe Grenzüberschreitungen zeigen sich ebenso in den Eisverlusten des „dritten Pols“, des Himalaya/Hindukusch Gebirges, wo ein Drittel der Eismassen bereits nicht mehr zu retten ist (was die Trinkwasserversorgung von 2 Milliarden Menschen gefährdet) und auch der Rest bei weiterer Erwärmung instabil werden kann (Wester et al. 2019; Maurer et al. 2019). Während die Antarktis die Schwelle zu einem Netto-Eisverlust (Schneefall minus Abtauen) bereits überschritten hat, liegt z. B. die aktuell beste verfügbare Schätzung für diesen Schritt für das Grönlandeissystem bei 1,6° (Ch3: 163). Weitere Kippunkte zwischen 1,5° und 2° sind nicht unwahrscheinlich, insbesondere wenn die menschliche Misswirtschaft fortgesetzt wird: nach neueren Schätzungen kann der Übergang des Amazonas zu einer Buschsteppe nicht nur an einem Kippunkt von ca. 4°C irreversibel werden, sondern auch wenn 20–25% des Gesamtwaldes verloren gehen, genauer gesagt: von Menschen zerstört werden, meist von großen Agrarkonzernen. 17% Verlust haben wir bereits erreicht, und wenn sich die Politik nicht grundsätzlich ändert, werden wir die 20% bei Amtsende des rechts-extremen brasilianischen Präsidenten überschritten haben. Das hätte signifikante Folgen für die Niederschläge und damit die Landwirtschaft in weiten Teilen Südamerikas, würde aber auch das globale Windsystem und damit die Extremwetterlagen in Nordamerika

¹ Die systematische Abschätzung der Fehlerbreiten in der naturwissenschaftlichen Analyse im IPCC SR 15 verdeutlicht dieses Zitat: „This assessment suggests a remaining budget for limiting warming to 1.5°C with a two-thirds chance of about 550 Gt CO₂, and of about 750 Gt CO₂ for an even chance [...]. Remaining budgets applicable to 2100, would approximately be 100 Gt CO₂ lower than this to account for permafrost thawing and potential methane release from wetlands in the future. These estimates come with an additional geophysical uncertainty of at least ±50%, related to non-CO₂ response and TCRE distribution. In addition, they can vary by ±250 Gt CO₂ depending on non-CO₂ mitigation strategies as found in available pathways. [...] Staying within a remaining carbon budget of 750 Gt CO₂ implies that CO₂ emissions reach carbon neutrality in about 35 years, reduced to 25 years for a 550 Gt CO₂ remaining carbon budget [...]. The ±50% geophysical uncertainty range surrounding a carbon budget translates into a variation of this timing of carbon neutrality of roughly ±15–20 years.“ (Ch2: 5). „No pathways were available that achieve a greater than 66% probability of limiting warming below 1.5°C during the entire 21st die century“ (Ch2: 8).

² Der irreversible Gletschereisverlust ist inzwischen nicht nur in der Westantarktis zu beobachten (Showstack 2014; Rignot et al. 2014; Joughin et al. 2014; Feldmann, Levermann 2015) sondern auch in der Zentral-Ostantarktis (Rintoul et al. 2016).

und darüber hinaus beeinflussen. Solche Auswirkungen können aber in IAM Modellen nicht abgeschätzt werden (die im SP15 verwandten Modelle bilden die Rückwirkungen der Klimakrise auf Wirtschaft und Gesellschaft generell nicht ab).

Ein weiterer Grund Politikvorschläge abzulehnen, die auf eine Überschreitung des Schwellwerts von 1,5° mit anschließender Kompensation durch „negative Emissionen“ setzen ist, dass sie auf die Reversibilität der Klimafolgen setzen, also annehmen, dass durch Reduzierung des atmosphärischen Gehalts an CO₂-Äquivalenten der status quo ante wiederhergestellt werden könne. Das stimmt schon rein physikalisch nicht, denn die Reaktion des Klimas auf akkumulierte Treibhausgase für ansteigende und sinkende atmosphärische CO₂-Konzentrationen ist unterschiedlich: Trägheiten im Kohlenstoffzyklus und im Meereswärmehaushalt führen zu einer Hysterisis-Kurve. Dieses asymmetrische, pfadabhängige Verhalten ist noch nicht gut quantifiziert und stellt eine wichtige Wissenslücke dar (Ch2: 21). Erst recht existiert Reversibilität nicht in biologischen und noch weniger in sozioökonomischen Systemen (Allen 1997). Stattdessen stellt die Abfolge von erst Überhitzung und anschließender Abkühlung eine doppelte Belastung für die Biodiversität dar, für die Verlagerung von Lebensräumen, die Störung von Nahrungsnetzen, die Desynchronisierung von multi-Spezies-Prozessen (Blüte und Erscheinen der Bestäuber, Reife und Erscheinen der Biocontrol-Populationen, Räuber und Beute, etc.), mit entsprechenden Risiken für die biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen (IPBES 2019). Und die Annahme, dass wirtschaftliche, technische, soziale und andere gesellschaftliche Entwicklungen auf einen Vorzustand zurückgestellt werden könnten, ist ganz offensichtlich unreal.

Verschärfend kommt hinzu, dass auch bei Anwendung aller bekannten „negative emissions“-Technologien keineswegs sichergestellt ist, dass die im Vertrauen

auf sie in Kauf genommenen höheren Konzentrationen an CO₂-Äquivalenten wirklich rückgängig gemacht werden können, denn die Technologien sind nicht nur risikobehaftet, sondern auch unsicher (Ch2: 4). Keine derartige Technologie ist jemals in der notwendigen Größe realisiert worden; für eine Senkung der atmosphärischen CO₂-Konzentration um 50 ppm müssten 400 Gt CO₂ ausgetragen werden – weitere Spurengase mit hoher Treibhausgaswirkung bleiben dabei außer Betracht (Niall et al. 2012). Als Resultat wachsen die Bedenken hinsichtlich des Potenzials, der Machbarkeit, Eignung und Nachhaltigkeit solcher Technologien (Ch2: 31). Dem IPCC ist klar, dass die Technologien für CDR (Carbon Direct Removal) oder „negative Emissionen“ weder nachgewiesen wirksam noch allgemein akzeptiert sind.³ Trotzdem bilden sie das Rückgrat fast aller Szenarien, auch wenn aktuelle Analysen die quantitativen Hoffnungen dämpfen (Smith et al. 2016; Minx et al. 2018; Fuss et al. 2018; Conniff 2019). Dass sie dennoch als unverzichtbar erscheinen, ist u. a. eine Folge der Tatsache, dass fast alle Szenarien (alle mit Ausnahme des neuen „extreme Nachhaltigkeit“ Szenarios) von der fortgesetzten Nutzung von Atom- und Kohlekraftwerken ausgehen – fossilfreie Energiesysteme werden zwar als machbar erkannt, sind aber nach den ökonomischen IAM-Modellen zu teuer (wobei wie erwähnt die sozioökonomischen Folgekosten des Klimawandels nicht oder nur teilweise berücksichtigt werden)(IPCC 2018). Andere Studien, die mit anderen Modellen arbeiten, kommen in diesem Punkt zu ganz anderen Ergebnissen (u. a. UBA 2019; BfN 2018).

Auch aufgrund der Tatsache, dass Technologien zur Rückgewinnung von CO₂ aus der Luft vor Mitte des Jahrhunderts nur sehr beschränkt zur Verfügung stehen werden (Nemet et al. 2018), sind die meisten im IPCC Report beschriebenen Szenarien solche mit Overshoot. Die Frage ist also, ob eine Begrenzung des Klimawandels auf 1,5° solche Technologien erfordert, und ob diese unter Berücksichtigung von Effektivität,

³ „Most CDR technologies remain largely unproven to date and raise substantial concerns about adverse side-effects on environmental and social sustainability“ (Ch2: 39). „The technical, political, and social feasibility of scaling up and implementing land-intensive CDR technologies is recognised to present considerable potential barriers to future deployment“ (Ch3: 160).

Effizienz und Nebenwirkungen geeignete Vorschläge darstellen.

Unseres Erachtens erfüllt kaum eine der vorgeschlagenen Maßnahmen die Kriterien nachhaltiger Entwicklung – einige müssten modifiziert, viele aber eliminiert werden. In Teil 2 begründen wir unsere Kritik, während wir in Teil 3 die Maßnahmen benennen, deren nachhaltig nutzbares Potenzial in den Szenarien unberücksichtigt bleibt. Teil 4 verweist auf die Notwendigkeit der Integration derartiger Schritte zum Klimaschutz mit einer breiten Umwelt- und Nachhaltigkeitsagenda.

2. Mene, mene, tekel – gezählt, gewogen und zu leicht befunden.⁴

Die Vorschläge der IPCC Szenarien

Ob ein Maßnahmenbündel als zielführend betrachtet werden kann, hängt u. a. davon ab, welche Annahmen über Quellen und aktivierbare Senken von Treibhausgasen gemacht werden. Bei letzteren dominiert im SR 15 neben Aufforstung und Wiederbewaldung insbesondere BECCS, der Plan aus Biomasse Energie zu gewinnen und die bei der Verbrennung entstehenden CO₂-Emissionen aufzufangen und unterirdisch zu speichern. Andere Methoden, die in Szenario-Narrativen eine Rolle spielen, aber in der großen Mehrheit der Modelle noch nicht abgebildet sind, sind die Einbringung von Pyrolysekohle in den Boden (Biochar oder Terra Preta), Kohlenstofffixierung im Boden und die Kohlenstoffbindung durch Gesteinsverwitterung („enhanced weathering“); der Bericht betont die substanzial geringere Inanspruchnahme von Boden und Wasser durch diese Methoden, und erhofft sich Zusatznutzen (Ch3: 159).

In allen Fällen gilt, dass CO₂ aus der Atmosphäre oder aus Abgasströmen einzufangen und zu binden, zuallererst Energie erfordert, denn das CO₂-Molekül befindet sich chemisch auf einem sehr niedrigen Energieniveau. Man muss es daher unter hohem Energieaufwand aus der Luft extrahieren, binden, konzentrieren, an andere Moleküle binden und schließlich irgendwo ablagern. Die verschiedenen Verfahren der negativen Emissionen unterscheiden sich dabei nicht nur in der Methode, wie das CO₂ eingefangen werden soll, sondern auch in der Quelle dieses erforderlichen Energieaufwandes. Im IPCC-Bericht ist nicht immer klar, ob die genannten Abscheidemengen Brutto- oder Nettosummen sind, und welcher Energiemix ggf. bei Berechnung der Nettozahlen zugrunde gelegt wurde. Energieaufwand und Energiemix würden auch die angegebenen Kosten in \$ pro t CO₂ beeinflussen.

Schließlich würde die Extraktion von CO₂ aus der Atmosphäre voraussichtlich zu einer Freisetzung aus den Weltmeeren hervorrufen, die bisher den größten Teil der CO₂-Emissionen absorbiert haben; dann wäre der Nettoeffekt der Extraktion nur ca. halb so hoch (Rahmsdorf 2019).

Ozeandüngung

Die größte natürliche Senke für CO₂ sind die Ozeane: sie haben bisher ungefähr 30 Prozent des bisher emittierten anthropogenen Kohlendioxids aufgenommen (IPCC 2014). Insbesondere pflanzliches Meeresplankton, welches etwa die Hälfte der weltweiten Photosyntheseleistung erbringt (Leujak et al. 2011), nimmt in großen Mengen CO₂ auf. Über die Nahrungskette gelangt das gespeicherte Kohlendioxid in organischer Form in weitere Meeresorganismen wie Kleinkrebse, Fische oder Wale. Sterben diese Organismen oder das Plankton, sinken sie meist ab. Ein Großteil dieser Biomasse wird dabei während des Transports und im Sediment von Bakterien verwertet, wobei das in den Lebewesen gespeicherte Kohlendioxid wieder an das umgebende Wasser abgegeben wird und über die Ozeanzirkulation irgendwann wieder in Kontakt mit der Atmosphäre gelangt. Nur ein kleiner Teil der Biomasse sinkt in die Tiefsee, wo er tiefer ins Sediment am Meeresgrund eingelagert wird und damit ein Teil des ursprünglich im Plankton gespeicherten Kohlendioxids der Atmosphäre für längere Zeiträume – bis zu 1.000 Jahren – dem Austausch mit der Atmosphäre entzogen ist (sog. biologische Pumpe) (DFG 2018, Salter et al. 2014).

In ca. einem Viertel der Weltmeere herrscht ein natürlicher Mangel an Pflanzennährstoffen, insbesondere an Eisen (DFG 2018). Daher wurden bereits vor Jahren Ideen für eine künstliche Eisendüngung entwickelt. Durch Düngung mit Eisen ließe sich das Planktonwachstum beachtlich ankurbeln, so dass sich die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre verstärken würde. Damit könnte letztlich auch mehr Kohlendioxid durch die abgestorbene Biomasse in die Tiefsee transportiert werden (AWI 2014, DFG 2018, Salter et al. 2014). Zwar kann durch die Eisendüngung das Planktonwachstum und die Kohlendioxid-Aufnahme zunehmen (Bakker et al. 2001; Sarmiento, Orr 1991), aber das Potenzial wird oft deutlich überschätzt, da die Menge Plankton, die tatsächlich in die Tiefe absinkt und damit der Atmosphäre langfristig Kohlendioxid entzieht, gering ist (Fuss et al. 2018).

⁴ Diese Nachricht als Geisterschrift an der Wand galt Belšazar, dem Sohn des Nebukadnezar, und verkündete den baldigen Zusammenbruch seiner Macht. Nach Bibel, Dan 5,8.

Experimente haben diese kritische Einschätzung bestätigt, z. B. das deutsch-indische LOHAFEX-Experiment, in dem durch das deutsche Forschungsschiff Polarstern 10 t Eisen in Form von Eisensulfat in einem 300 Quadratkilometer großen Versuchsgebiet ausgebracht worden sind (Leujak et al. 2011). Eine Studie zur natürlichen Eisendüngung im Südpolarmeer hat gezeigt, dass zusätzliches Eisen die Wirksamkeit der biologischen Pumpe, die Kohlendioxid aus den oberen Wasserschichten in die Tiefsee transportiert, sogar reduziert (AWI 2014). Daneben kann Eisendüngung dazu führen, dass sich neben Phytoplankton auch Kalkschalen bildende Meeresbewohner vermehren, welche sich von den Algen ernähren. Diese Tiere setzen Kohlendioxid frei, wenn sie ihre Kalkschalen bauen. Sterben diese Lebewesen in einem Meeresgebiet mit einem hohen natürlichen Eiseneintrag, werden dort bis zu 30% weniger Kohlendioxid in die Tiefsee verfrachtet als bisher angenommen (AWI 2014). Der geringen Effektivität stehen erhebliche ökologische Nebenwirkungen gegenüber; eine Reihe von potenziellen Gefahren und Nebeneffekte sind für marine Ökosysteme bekannt (Ziebarth 2010). So wirkt sich Eisendüngung z. B. auf die Artenzusammensetzung eines Lebensraumes aus (AWI 2014), wenn Algenarten, die bei höherer Nährstoffzufuhr schneller wachsen bzw. die schnell besonders viel CO₂ aufnehmen, andere Algen verdrängen (Ziebarth 2010). Eine solche Artenverschiebung kann sich auf die Nahrungsnetze und damit auf das gesamte Ökosystem auswirken. Außerdem kann es zur Bildung anthropogen forcierter (toxischer) Algenblüten kommen (Deutscher Bundestag 2009, Leujak et al. 2011), die erhebliche Störungen im Ökosystem auslösen können, wie in durch Umweltverschmutzung eutrophierten Meeresbereichen beobachtet werden kann. Dazu zählt vor allem die Entwicklung sogenannter „Todeszonen“, also von Meeresbodenbereichen, in denen aufgrund der Zersetzung des sedimentierten Planktons der lebensnotwendige Sauerstoff vollständig aufgezehrt worden ist. Zurzeit wird eine bedrohliche Ausweitung solcher Zonen beobachtet (Jokinen et al. 2018) und dieser Trend würde sich bei der Düngung von Meer-

resgebieten erheblich verstärken. Als Nebeneffekt des Zuviel an Nährstoffen und Zuwenig an Sauerstoff kann sich zudem durch bakterielle Aktivität verstärkt das stärkere Treibhausgas Lachgas bilden, das aus dem Meer in die Atmosphäre aufsteigen kann und so die Effekte der Ozeandüngung aufwiegt.

Zusätzlich verstoßen solche Experimente und Forschungsvorhaben gegen das auf der 9. Vertragsstaatenkonferenz der Konvention über die biologische Vielfalt (COP 9 der CBD) in Bonn beschlossene Moratorium zur Düngung der Ozeane (Beschluss IX/16) (Deutscher Bundestag 2009).

Insgesamt ist Ozeandüngung weder im großen Maßstab einsetzbar, noch sind Potenzial und/oder Nebenwirkungen ausreichend bekannt. Insbesondere das Zusammenspiel der gegenwärtigen Erwärmung und Versauerung der Meere und der zukünftigen Effekte einer Ozeandüngung kann zu unvorhersehbaren Effekten auf die Meeresökosysteme führen. Es gibt also wissenschaftliche, rechtliche, ethische und politische Bedenken gegen die Ozeandüngung.

Gesteinsverwitterung und Meeresalkalinisierung

Die Aufnahme des durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe ausgestoßenen Kohlendioxids durch die Meere führt zur Bildung von Kohlensäure und ist verantwortlich für die zunehmende Versauerung der Ozeane (BIOACID 2019). Die natürliche Verwitterung wirkt einer Ozeanversauerung entgegen (Albright et al. 2016, Feng et al. 2016) indem die bei der natürlichen Verwitterung aus dem Gestein gelösten mineralischen Bestandteile vom Land ins Meer geschwemmt und in Form von Bikarbonat- und Karbonat-Ionen permanent im Meerwasser gebunden werden (DFG 2018, Ziebarth 2010). Dadurch werden die Meeresgebiete basischer (Alkalisierung der Ozeane), was ihre CO₂-Pufferkapazität erhöht und wodurch sie mehr Kohlendioxid aufnehmen können (DFG 2018). Findet der Alkalisierungsprozess im Oberflächenwasser in Kontakt mit der Atmosphäre statt,

kann das durch Verwitterung aus dem Wasser entfernte CO₂ durch atmosphärisches Kohlendioxid ersetzt werden.

Soll dieser natürliche Prozess technisch verstärkt werden, müssten die für die chemische Bindung von Kohlendioxid verantwortlichen basischen Substanzen wie z. B. Silikat- oder Karbonatgesteinsmehl direkt ins Oberflächenwasser des Ozeans eingeleitet werden. Dazu müssten diese Materialien an Land in Minen abgebaut bzw. industriell hergestellt und zu einem feinen Pulver zermahlen oder in einem industriellen Prozess chemisch aufbereitet werden, bevor sie entweder in Anlagen an Land im Meerwasser gelöst und anschließend ins Meer geleitet oder mit großen Frachtschiffen aufs Meer hinaus transportiert und dort im Wasser verteilt werden. Diese Behandlung ist notwendig, damit sich die Mineralien schnell im Wasser auflösen und nicht in die Tiefe absinken, bevor sie mit dem Kohlendioxid reagieren.

Damit durch die beschleunigte Verwitterung ein globaler Effekt erreicht wird, müsste für die benötigte Menge an Mineralien ein neuer Bergbau in großen Dimensionen etabliert und eine große industrielle Fertigung aufgebaut werden. Nach DFG (2018) wird geschätzt, dass für eine weltweite Kompensation des CO₂-Ausstoßes pro Jahr Mineralien in einem Umfang ausgebracht werden müssten, die der Menge der heutzutage abgebauten Kohle entspricht. In der Summe wäre diese CDR-Methode kostspielig, energieintensiv und auch an Land mit großen Eingriffen verbunden (weitere Details finden sich im DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1689).

Hinzu kommt, dass Erkenntnisse über die Auswirkungen der erhöhten Mineralienkonzentration auf die Meereslebewesen praktisch nicht vorliegen. Manche Gesteine enthalten Eisen, das im Meer als Dünger wirkt (s.u.), möglicherweise aber auch giftig wirkende Verunreinigungen, was zu unbeabsichtigten Nebenwirkungen auf Meeresökosysteme führen könnte.

Die Abscheidung von CO₂ und seine Speicherung im Untergrund sind die technische Grundlage unterschiedlicher Konzepte mit Carbon Capture and Storage (CCS), eine der bevorzugten Lösungstechnologien im IPCC SR15 Bericht (wenn auch weniger als in früheren Berichten). Allerdings ist das Gesamtpotential zur dauerhaften Speicherung von CO₂ im Untergrund (Gasfelder, Aquifere) begrenzt; es wird auf 10.000 Gt CO₂ geschätzt (Global CCS Institute, 2018). Zudem liegen die Speichermöglichkeiten meist weit entfernt von den CO₂-Emissionsquellen, was eine aufwändige CO₂-Bindungstechnologie (Capture) für den Transport notwendig macht. Die unterschiedlichen Bindungsverfahren sind ausnahmslos energieaufwändig, was beim Einsatz in Kraftwerken deren Wirkungsgrad um 30–50% reduziert, und damit 60–100% Mehreinsatz an Energieträgern für die selbe Nutzenergiebereitstellung erfordert. Bei Kohlekraftwerken bedeutet dies bis zu doppelt so hohe Umweltschäden bei der Förderung, bei Biomassekraftwerken eine Vergrößerung bis zur Verdoppelung der Fläche zur Gewinnung der Biomasse.

CCS Carbon Capture and Sequestration

Die CCS Technologie wurde vor 10 Jahren intensiv diskutiert, als Methode zur Säuberung der Emissionen von Kohlekraftwerken. Sie sollte eine „Brückentechnologie“ in die Nach-Kohle-Zeit sein, wurde aber schon damals als ungeeignet kritisiert. Zwar sind die Einzelkomponenten in kleinem Maßstab bekannt, aber alle CCS Technologien sind technologisch unreif und/oder kommerziell nicht verfügbar (Sanchez et al. 2018); bis heute gibt es in ganz Europa trotz unterstützender Gesetzgebung und finanzieller Förderung keine einzige große, kommerzielle CCS-Anlage (EEA 2020). Mit einer Realisierung in der klimapolitisch notwendigen Größenordnung wird auch vom IPCC erst in der zweiten Jahrhunderthälfte gerechnet – CCS kann also nicht dazu beitragen, das Klimabudget einzuhalten und ist nur relevant, wenn man einen „Overshoot“ zulassen will.

Zudem ist CCS energetisch ineffizient, teuer und mit hohen Umweltrisiken verbunden (Günther 2010; Neumann 2010). Ineffizient ist CCS, weil schon die CO₂-Extraktion mit verschiedenen Gaswäsche- und Absorptionsverfahren erhebliche Mengen an Energie kostet. Bei Verbrennungskraftwerken wird der Stromwirkungsgrad um 10–15 Prozentpunkte (nicht Prozent!) gemindert, also z. B. von 45% auf 30%, oder von 30% auf 15%. Kraftwerke mit CCS würden 15–25% mehr Primärenergie verbrauchen, was unmittelbar die Emissionen an anderen Schadstoffen erhöhen würde, insbesondere Feinstaub und N₂O (EEA 2011).

Zu teuer ist CCS nicht nur wegen der Anlagen- und Energiekosten, sondern insbesondere, weil die Kosten der Erzeugung von Strom aus Windenergie und Photovoltaik in den letzten 10 Jahren so drastisch gesunken sind, dass Verbrennungskraftwerke mit CCS sich ökonomisch nicht rechnen. Umweltrisiken entstehen, wenn die dauerhafte Ablagerung von CO₂ in den mengenmäßig und örtlich begrenzten Einlagerungsmöglichkeiten zu Schäden in den Grundwasserkörpern und dauerhafter Beeinträchtigung des Grundwassers führen. Das gilt für die Einlagerung in Aquifere ebenso wie für Prozessschäden wie die Verbindung zuvor getrennter Grundwasserschichten durch die Einbringung mittels Bohrungen; saline Wässer können die wertvollen nutzbaren Grundwasserleiter kontaminieren.

Aus all diesen Gründen ist die öffentliche Akzeptanz wie die Förderung für CCS-Technologien gering (Ch4: 343); auch das IPCC konzidiert, dass die beschriebenen Entwicklungspfade „inadäquate Annahmen bezüglich der Entwicklung der gesellschaftlichen Unterstützung und der Governance-Strukturen“ machen (Ch4: 343).

Anders als die Anwendung von CCS um eine angeblich „saubere Kohleverbrennung“ zu erreichen sind Techniken sinnvoll, die CO₂ aus Biogasanlagen nutzen.

Dort muss es ohnehin abgeschieden werden und kann mit Wasserstoff aus der Elektrolyse zu Methan reagieren. Das würde den Nutzen von Biogas/Klärgas-Anlagen und Power to Gas koppeln und dabei die Speicherbarkeit von Biomasse, Biogas und Methan zur Flexibilisierung verwenden (Viessmann 2019). Das Festhalten an CCS im großen Maßstab wird mit Kostenargumenten gerechtfertigt, da ohne die Optionen CCS und BECCS (s.u.) die von den IAM Modellen errechneten Kosten deutlich steigen würden (Ch4: 343) – und da die Modelle auf Kostenminimierung programmiert sind, dominieren Szenarien, die dem Willen der Öffentlichkeit entgegengesetzt sind (Spangenberg, Polotzek 2019). Dass es sich hier um eine systemische Eigenschaft der IAM-Modelle handelt, zeigt sich auch daran, dass die aktuellen Zukunftspläne der EU Kommission auf der Basis ähnlicher Modelle vergleichbar argumentieren: die mangelnde Akzeptanz ist bekannt, die Bürger*innen sollen einbezogen werden, nicht aber ihre Argumente berücksichtigt werden: am Ende müssen sie zustimmen (European Commission 2018; 2019).

Direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS)

Die direkte Luftentnahme zur Extraktion von CO₂ (DAC, mit Ablagerung DACCS) ist ein Teil der physikalischen Methoden zur CO₂-Bindung. Dabei wird das CO₂ nicht dem Abluftstrom, sondern direkt der Atmosphäre entnommen, wo es in einer sehr geringen Konzentration von 400 ppm vorliegt. Entsprechend hoch ist der Energieaufwand, der im Absorptionsprozess erforderlich ist – ein Hemmnis, das auch das IPCC thematisiert aber in der Öffentlichkeit wenig bekannt ist. Tatsächlich ist der Energieaufwand immens – um 1 tCO₂ abzuscheiden und einzulagern bedarf es 1.000–2.000 kWh Wärme plus 200–2.000 kWh Strom (Ausfelder, Dura 2019). Dieser wird v. a. für den Betrieb von Ventilatoren und Pumpprozessen benötigt; Wärme wird benötigt, um das CO₂ aus absorbierenden Stoffen wieder auszutreiben, um es weiter zu konzentrieren und einer Speicherung – wo auch immer

– zuzuführen. Hier gelten die gleichen Restriktionen und Risiken wie beim Einspeichern von CO₂ in tiefer liegenden wasserführenden Schichten.

Energetisch macht DACCS keinen Sinn: Weil bei Verwendung fossiler Energieträger die CO₂ Emissionen wieder bei ca. 1 t CO₂ lägen, erfordert das Verfahren die Nutzung großer Mengen regenerativer Energien unbekannter Herkunft. Dagegen wäre die Vermeidung von Emissionen durch Nutzung der Regenerativen zur Substitution fossiler Energieträger, und durch Effizienzsteigerungen eine Größenordnung kostengünstiger.

BECCS Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung

Im Unterschied zum CCS-Versuch, die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger, insbesondere Kohle, um 80–95 % zu reduzieren, setzen Techniken des BECCS in verschiedener Weise auf die Verbrennung oder Verkohlung der zuvor gewachsenen und gewonnenen Biomasse. Nur das LED-Szenario des IPCC kommt ohne BECCS aus, in den anderen steigt er nach 2030 auf 3 (5) Gt CO₂ yr⁻¹ im Jahre 2050, und auf 6 (12) Gt CO₂ yr⁻¹ in 2100 in den Szenarien ohne (mit begrenztem) Overshoot (Ch2: 43). Würden über 100 Jahre ca. 500–1.000 Gt CO₂ aus der Erdatmosphäre entzogen, so könnte eine Minderung der CO₂-Konzentration um 60–120 ppm erzielt werden, verbunden mit der Hoffnung die globale Erderwärmung um 0,5–1,0 °C zu mindern (McGlashan et al. 2012). Das ist weit mehr als die Potenziale von 0,5–5 Gt CO₂ yr⁻¹ in der neueren Literatur (Ch4: 342–343) und unterstreicht erneut, dass BECCS keine Lösung des Klimaproblems darstellt. Auch wenn im Vergleich zum letzten großen IPCC-Bericht die Bedeutung von BECCS abgesenkt wurde, bildet es doch immer noch das Rückgrat aller Strategien, die nach einer Überschreitung des CO₂-Budgets eine Extraktion aus der Atmosphäre annehmen, um wieder unter die Zielkonzentration zu kommen. Die vorgesehenen Biomassequellen sind – ähnlich wie bei Biofuels (s.u.) – Rest-

stoffe, Holz- und Graspflanzen (Ch2SM: 16). Insofern kann BECCS als eine Kombination der Strategien „Biofuels“ und „CCS“ gesehen werden; die o.g. Kritikpunkte zu den Teilstrategien treffen auch auf BECCS zu. So sind z. B. der Energieaufwand für die Biomassegewinnung und der Effizienzverlust durch CO₂-Abscheidung auch bei BECCS höchst relevant. Das IPCC sieht Begrenzungen für BECCS – Biomasse durch den Energie-, Wasser- und Nährstoffbedarf ebenso wie in den begrenzten verfügbaren sicheren Endlagerungsmöglichkeiten und konkurrierenden Politikzielen (Ch4: 343).

Szenarien, die den Bedarf an Land für BECCS abschätzen, kommen auf Werte von 25–46 % der Acker- und Dauerkulturfleichen schon für eine Begrenzung auf 2 °C (Ch4: 343). Außer Acht gelassen wird beim Konzept des BECCS oft, dass die Flächen für den Biomasseanbau nicht unbedingt dort liegen, wo vermeintlich das CO₂ eingelagert werden kann. Man müsste die Biomasse erst zu den Raffinerien und die Energie zu den Verbraucher*innen transportieren, um wenigstens einen Teil der Energie zu nutzen, und man müsste das CO₂ wiederum in Pipelines oder Transportern zu den Lagerstätten bringen – das alles kostet Energie. Insgesamt sollte die Warnung des Science Advisory Council der Europäischen Akademien der Wissenschaften ernstgenommen werden, dass „BECCS mit substanziellen Risiken und Ungewissheiten verbunden bleibt, sowohl was die resultierenden Umweltbelastungen betrifft wie bezüglich der Fähigkeit, eine Netto-Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre zu erreichen“ (EASAC 2019, S. 2). Sie schlussfolgern, dass es keine verlässliche wissenschaftlich-technische Grundlage für eine Politik gibt, die auf BECCS setzen würde und empfehlen „politische Entscheidungsträger sollten frühe Entscheidungen zugunsten einer Technologie wie BECCS vermeiden“ (ibid).

Pyrolysekohle/Terra Preta/Biochar

Eine weitere Methode der Herstellung von Negativ-Emissionen durch Biomassennutzung setzt auf die Pyrolyse, bei der eine Verkohlung unter Luftabschluss erfolgt und eine Pyrolysekohle entsteht. Das IPCC verspricht sich von Pyrolysekohle nicht nur eine Kohlenstoffspeicherung von bis zu 35 Gt CO₂ yr⁻¹, sondern auch eine erhöhte Bodenfruchtbarkeit, positive Effekte für den Bodennährstoffhaushalt und verringerte N₂O Emissionen sowie – als Nebenprodukt – eine Energieproduktion von bis zu 65 EJ yr⁻¹ (Ch3: 345). Nur passen diese Angaben nicht zusammen: 1 Mrd. ha aufwachsender Wald binden pro Jahr mit 5 t CO₂ ha⁻¹ und 1,5 kWh m² ca. 5 Gt CO₂ als Holz, mit einem Energieinhalt von 50 EJ im Jahr, also deutlich weniger als 65 EJ yr⁻¹. Zusätzlich bleiben bei den meisten Studien die erheblichen Energieverluste des Pyrolyseprozesses unberücksichtigt; etwa die Hälfte des Energieinhaltes geht unvermeidlich als Umwandlungsverlust und Abwärme verloren, wenn Holz mittels der Köhlerei (Pyrolyse) in Pyrolysekohle (irreführend auch als „Bio-kohle“ oder „Bio Char“ bezeichnet) umgewandelt wird. Alternativ hätte man den Energiezuwachs der Wälder auch zur Substitution von fossilen Energieträgern nutzen können.

Nicht nur verbunden mit diesem Konzept, der sog. „Terra Preta“, wird vorgeschlagen, diese Holzkohle im Ackerbau einzusetzen und den Kohlenstoff in den Boden einzugraben, teils mit Verweis auf die indigenen Praktiken im Amazonasbecken (Soentgen et al. 2017). Doch das Nacheifern eines durch indigene Völker verursachten und für den Regenwald insgesamt minimalen Holzkohleeintrags kann nicht auf den Mega- und Gigatonnen Maßstab aufgebläht werden ohne erhebliche Nebenwirkungen zu verursachen. Zudem könnten Biochar-Ablagerungen (ebenso wie Aufforstungen) in hohen Breitengraden durch geringere Sonnenreflexion (Albedo) sogar zur Erwärmung beitragen (Lenton 2010).

Auch die bodenverbessernden Eigenschaften von

Pyrolysekohle sind bisher nur partiell belegt. Sie sind darin begründet, dass die Kohlepartikel eine sehr große Oberfläche aufweisen und so Humus, Nährstoffe und Wasser besonders gut binden könnten. Daher sind ertragssteigernde Effekte der Pyrolysekohle besonders in sandigen Böden (oder eben in Tropenböden), die nur über ein geringes Wasser- und Nährstoffaustauschvermögen verfügen, gut erkennbar. Lehmige Böden Mitteleuropas haben hervorragende Nährstoffaustauscheigenschaften und brauchen daher eine diesbezügliche Verbesserung nicht (Flessa et al. 2018), zumal Pyrolysekohle dem Bodenleben keine Nahrung bietet.

Schließlich ist die Pyrolyse immer mit der Entstehung polyzyklischer Kohlenwasserstoffe (PAK) verbunden (BAuA 2016), die krebserregend, mutagen und teratogen sein können (UBA 2016). Diese Schadstoffe sind teilweise sehr stark an die Pflanzenkohle gebunden, so dass sie kaum ausgewaschen werden. Eine langfristige Freisetzung dieser sehr persistenten Stoffe kann aber nicht ausgeschlossen werden. Deshalb ist schon aus Sicht einer nachhaltigen Stoffpolitik die Einbringung von unvermeidlich mit PAK kontaminierter Pyrolyse-Pflanzenkohle abzulehnen (BUND 2015; 2019).

Biofuels

Ebenfalls biomassebasiert ist das Biofuels-Konzept. Nachwachsende Rohstoffe sollen als Alkohole (Methanol, Ethanol) Benzin, als Pflanzenöle Diesel und als Biogas Erdgas ersetzen. Dabei wird die Begrenztheit der verfügbaren Flächen häufig übersehen: nur 37,7 % der weltweiten Landfläche oder 11 % der Erdoberfläche, ca. 5 Mrd. ha, sind landwirtschaftliche Nutzfläche (UBA 2013), und diese werden zunehmend für die Futtermittelproduktion genutzt. Der Preis für die 10 % der globalen Nutzenergieversorgung, die heute aus Biomasse kommen, sind rund 40 Prozent der weltweiten „Nettoprimärproduktion“ (HANPP Human Appropriation of Net Primary Pro-

duction, Haberl et al. 2004). Bereits dieses Niveau an Biomassenutzung ist mitursächlich für den weltweiten Verlust an biologischer Vielfalt – das zeigt die Begrenztheit der Bioenergiepotenziale: mehr Effizienz der Nutzung ist denkbar, aber eine deutliche Ausweitung der globalen Anbauflächen wäre ökologisch unverantwortlich (IPBES 2019).

Biomasse ist also als Substitut für konventionelle Energieträger quantitativ unzureichend (Ulgiati 2001) und die Intensivierung ihrer Nutzung deutlich über die Reststoffverarbeitung (Bioabfälle, Speiseöl, etc.) hinaus hat nur begrenzte Potenziale, bevor die Ökosystemleistungen gefährdet werden (EEA 2006). Während kleinmaßstäbliche Energie aus Biomasse traditionell und ökologisch oft positiv ist, bergen schon die gegenwärtigen Anlagen erhebliche Probleme. So werden durch die Subventionierung der Biomassegewinnung Grenzertragsstandorte lukrativ gemacht, die für den Schutz der Biodiversität wesentlich sind und nun entwertet werden; Graslandbiotope und ehemalige Stilllegungsflächen werden umgepflügt und bebaut und dabei artenreiche Biotope zerstört, die für Bodenbewohner und Brutvögel oft essenziell sind. Raps- und Maismonokulturen sind eine Gefahr für die biologische Vielfalt. Besonders krass ist dabei die EU-Förderung von Energie-Mais auf ehemaligen Moorböden, die diese Böden zu potenten CO₂-Emitenten macht. Die Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ist unvermeidlich (mit Ausnahme der Nutzung kontaminierter Standorte) – Energiepflanzen sind ebenso auf Wasser und Nährstoffe angewiesen wie Nahrungspflanzen (Bryngelsson, Lindgren 2013; Bringezu et al. 2012; Spangenberg, Settele 2009a). Werden die Nährstoffe durch Düngung zugeführt, ergeben sich zusätzliche Treibhausgas effekte durch N₂O-Emissionen, und der Methanschlupf von Biogasanlagen macht die theoretisch ermittelten Klimaschutzpotenziale weiter fragwürdig (UBA 2019). Während jedoch die gegenwärtigen Kleinanlagen stillgelegt werden können, wenn andere Pflanzen-

verwendungen lukrativer erscheinen und ein Teil der Schäden noch reversibel ist, trifft das bei der Errichtung großer Biomasse-Raffinerien nicht mehr zu, die Grundlage der Biomasse-Prognosen in den IAM-Modellen sind (Ch2, p.43). Diese brauchen ständig und dauerhaft große Mengen an möglichst homogener Biomasse, um optimale Erträge für das eingesetzte und langfristig gebundene Kapital zu erwirtschaften. Dazu werden meist Kurzumtriebsplantagen schnellwachsender Holzpflanzen (z. B. Pappeln) oder Gräser (z. B. Miscanthus) vorgesehen (Cornwall 2017). Potenzielle Konsequenzen sind lt. IPCC ein massiv steigender Süßwasserbedarf, verschärfte Konkurrenz um Land, Verlust an biologischer Vielfalt und Auswirkungen auf die Ernährungssicherheit (Ch2, p.43). Die Größe der Raffinerien wäre aus ökonomischen Gründen wohl der moderner Sägewerke vergleichbar; mit einer Mindestproduktion von 200.000 t Methanol pro Jahr würde jede Anlage jährlich ca. 500.000 t Holz benötigen und dafür eine Fläche von rund 35.000 ha (das entspricht einer LKW-Ladung alle 10 Minuten). Um den Transportaufwand als einen wesentlichen Kostenfaktor zu senken, müssten solche Raffinerien inmitten einer weitgehend homogenen und damit artenarmen Plantagenzone stehen. Werden die Bäume vollständig genutzt, leidet die Nährstoffbilanz und damit die Bodenfruchtbarkeit.

Das gilt auch für Raffinerien, die nicht Methanol für die Energiewirtschaft, sondern Vorprodukte für die Chemieindustrie herstellen. So ist die neue industrielle Bioraffinerie am Chemiestandort Leuna (geplanter Produktionsstart Ende 2022) auf eine Kapazität von 200.000 t/a ausgelegt, aus Laubholz sollen Monoethylenglykol, Monopropylenglykol und Industriezucker hergestellt werden. Anwendungsfelder für Bio-Monoethylenglykol sind unter anderem Textilien, PET-Flaschen, Verpackungen und Enteisungsmittel. Bio-Monopropylenglykol wird beispielsweise in Verbundwerkstoffen, Arzneimitteln, Kosmetika und Waschmitteln eingesetzt.

Solche Bioökonomie-Raffinerien der „zweiten und dritten Generation“ werden die genannten Probleme nicht lösen, sondern sie eher verschärfen (Kuchler 2014; Spangenberg, Settele 2009b; Giampietro, Mayumi 2012). Die Folgen des Energie- und Biomassepflanzenanbaus für die Verschlechterung der Bodenqualität ist gegenwärtig Gegenstand von Modellierungsbemühungen; diese Effekte wurden in den Szenarien nicht systematisch berücksichtigt (Ch2, p.43).

Da die Produktion von Biomasse für die Energieversorgung in Konkurrenz zum Anbau von Pflanzen für Nahrungsmittel und Tierfutter steht, wird das benötigte Viehfutter vornehmlich durch gentechnisch veränderte Soja aus Brasilien ersetzt, der neben der Viehzucht wichtigsten Ursache für die Vernichtung des Amazonasurwalds. Gleichzeitig werden die Lebensgrundlagen der Kleinbauern zerstört: 200 ha Land bieten in den Tropen die landwirtschaftliche Lebensgrundlage für ca. 70 Personen, schaffen aber nur vier Arbeitsplätze in Holzplantagen. Der Anbau von gentechnisch veränderten Herbizidresistenten Sojapflanzen auf aktuell über 90 Mio. Hektar (in Lateinamerika und den USA) führt zudem zum massiven Einsatz von Herbiziden, allen voran Glyphosat, was nicht nur die Biodiversität der Anbauregionen schädigt (Schütte et al. 2017), sondern auch die menschliche Gesundheit gefährdet (Richmond 2018).

Letztlich wäre der Großteil der Energienutzungen mit Strom aus Wind und Sonne sowie Sonnenwärme abzudecken und dies mit deutlich geringerem Flächenbedarf. Biomasseenergie macht nur Sinn aufgrund ihrer Speicherbarkeit und den für die Industrie erforderlichen hohen Temperaturen. Jegliche Verfeuerung dieser Biomasse zerstört diese hohe stoffliche Qualität und ist mit signifikanten Energieverlusten verbunden. Eine weitere Hoffnung, eine neue Energiequelle zu finden, sind Algen, insbesondere Mikroalgen, die in wassergefüllten Behältern unter Nutzung

der Sonnenenergie Photosynthese betreiben und Biomasse erzeugen. Dass sie damit keine Ackerflächen beanspruchen sind sie nach Aussagen von Energiekonzernen (ExxonMobile Anzeige: „Algae – Den Kraftstoff der Zukunft aus unerwarteten Quellen erzeugen“) und KIT-Forscher*innen „die unsichtbaren Hoffnungsträger einer klimaneutralen Energieversorgung“, denn „Mit den kleinen Einzellern lassen sich verschiedene Energieträger wie Biodiesel, Bioethanol und Biokerosin erzeugen. Und das ohne zusätzlichen Konkurrenzdruck um wertvolle, begrenzte Ressourcen wie Land, Wasser oder den Nährstoff Phosphat“ (idw 2020). Doch die Hoffnung trügt. Um die versprochene hohe Produktionsleistung zu erzielen brauchen die Algen hohe CO₂-Konzentrationen, und dies müsste entweder aus der Luft aufkonzentriert werden, oder es werden die stark CO₂-haltigen Abgase von fossil befeuerten Kraftwerken in die Behälter eingeleitet werden – letzteres aus Kostengründen, insbesondere wenn man die Algenproduktion in großem Maßstab durchführen wollte. In weiteren energieaufwändigen Schritten müssten die Algen dann aus dem Wasser extrahiert und getrocknet werden. Erst dann folgen die (ebenfalls energieaufwändigen) Schritte die notwendig sind, um die Biomasse in Methanol und andere Energieträger umzuwandeln. Betrachtet man die diversen Forschungsvorhaben oder Demonstrationsprojekte, so fällt auf, dass äußerst selten Angaben zur Energiebilanz oder Wirkungs- und Umsetzungseffizienzen gemacht werden. Das Ergebnis einer umfassenden Analyse ist ernüchternd: unter Einbeziehung aller Faktoren fand A. Weiss (2016), ebenfalls am Institut für Technikfolgenabschätzung ITAS des KIT in Karlsruhe⁵, dass im Gesamtprozess der Nettoenergieaufwand für Anlagen, Pumpenergie, Belüftung, Düngung usw. im optimalen Fall bei 1,8:1 liegt, d. h. dass aus dem Produktionsprozess pro eingesetzte 1,8 Einheiten Energie nur 1 Einheit Energie herauskommt (in der Realität liegt der Aufwand eher bei 3–4:1). Algensprit erweist sich daher eher als „Energievernichter“ denn als Klimaretter. Sonnenenergie kann

⁵ Annika Weiss hat in ihrer Doktorarbeit die Energiebilanzen von Biokraftstoffen aus Algen unter die Lupe genommen. Die wenigsten Projekte hatten laut Dokumentationen einen Nettoenergieaufwand von unter 1,0, d. h. dass mehr Energie herauskam, als aufgewendet wurde. Jedoch hatten alle diese Projekte mehrere Energieeinträge der Anlage unterschlagen, indem die Systemgrenzen der Betrachtung eingeschränkt worden waren. Zudem sank mit gesteigerter Produktionsrate der Gesamtwirkungsgrad, da der Betriebsaufwand überproportional stieg und die Algen sich gegenseitig „verschatteten“.

weitaus effizienter zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt werden und Kraftstoffe eher als Biogas aus Biomasseabfällen.

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen technologiezentrierten Ansätzen setzen die folgenden auf natürliche Prozesse der Kohlenstoffbindung in Ökosystemen, die durch Managementeingriffe intensiviert werden soll. Betrachtet man Pflanzen im Allgemeinen im Ackerbau oder Baumwachstum in Wäldern als eine Art Kollektor für Sonnenenergie, beträgt der „Wirkungsgrad“ nur etwa 1–2 kWh Energie/m² im Jahr im Ackerbau mit einer CO₂-Bindung von 2 kg/m²*a; ausgewachsener Wald liefert ca. 1 kWh Energie/m²*a bei einer CO₂-Bindung von 1 kg /m²*a oder 10 t CO₂-Bindung/ha*a. In Altwäldern findet CO₂-Deposition in Form großer Mengen von Falllaub und Totholz statt, von denen ein großer Teil dauerhaft in Böden festgelegt wird. Dies, und die CO₂-Sequestrierung durch die Nutzung von Holz in langlebigen Produkten stehen in Konkurrenz zu den genannten Verfahren der Biomassenutzung.

Bodenspeicherung

Die Speicherung im Boden hat sich vor Ort insbesondere beim ökologischen Landbau und in der Agroforstwirtschaft bewährt. Aber auch die, mit Maßnahmen wie Agroforstwirtschaft, Sanierung kontaminierter und degradierter Böden, ökologischem Landbau und eine naturschützender Forstwirtschaft können zur Speicherung beitragen (FAO 2019). Solche Strategien haben erhebliche positive soziale und ökologische Wirkungen wie erhöhte Bodenfruchtbarkeit und Stabilität, höhere Wasserspeicherkapazitäten und mehr biologische Vielfalt, ganz unabhängig von ihren Beiträgen zum Klimaschutz. Der Nährstoffgehalt der Böden und die Nahrungssicherheit werden positiv beeinflusst.

Als Nebenwirkung von Ökologisierung der Landwirtschaft, artgerechter Tierhaltung, insbesondere bei

Weidetieren, ermöglicht durch eine tiefgreifende Ernährungsumstellung (Umkehrung gegenwärtiger Trends zu steigendem Konsum tierischer Proteine), und nicht zuletzt durch den Ausstieg aus der Nutzung von NPK-Dünger (wegen des hohen Energieverbrauchs des Haber-Bosch-Verfahrens zur Stickstofffixierung) und seinen teilweisen Ersatz durch organische Düngemittel treten verringerte Emissionen und eine erhöhte Kohlenstoffbindung auf – ein willkommener Nebeneffekt einer Ökologisierung des Landbaus (FAO 2019).

Schließlich kann es nicht darum gehen, so viel toten Kohlenstoff wie möglich in die Böden zu bringen und sie zu Kohlenstofflagerstätten zu machen – wird die Kohlenstoffspeicherung zum dominierenden Zweck der Landbewirtschaftung, so kann dies die elementaren Ökosystemleistungen der Landwirtschaft untergraben und die biologische Vielfalt beeinträchtigen, wie nicht zuletzt Erfahrungen mit REDD+ zeigen (Fathauer 2014). Eine positive Kohlenstoffbilanz zeigt Ackerbau über längere Zeiträume nur dann, wenn dauerhaft zusätzlich Humus aufgebaut wird. Humusaufbau muss in erster Linie dem Aufbau des Bodenlebens und dem langfristig nachhaltig zu erwirtschaftenden Ertrag gelten. Entscheidend ist, die Bilanz der humusabbauenden Prozesse zugunsten humusaufbauender biologischer Prozesse zu verschieben. Dies schaffen in nennenswerten Größenordnungen nach heutigen Erkenntnissen nur der ökologische Landbau sowie Permakultur- und Agroforstsysteme, bei denen die Bäume langfristig ins System integriert sind (Idel, Beste 2018; Hülsbergen, Rahmann 2015).

Landwirtschaft

Weiterhin hohe Einsatzmengen von mineralischen Stickstoffdüngern führen zu anhaltenden Lachgas (N₂O) Emissionen (kritisch wegen der langen atmosphärischen Verweilzeiten), die auch in den Szenarien, die unter 1,5° bleiben, negative Emissionen (CCS, BECCS, Biochar, Forsten, s.u.) erforderlich machen;

die gegenwärtigen IAM können eine Reduzierung nicht abbilden. Eine Umstellung auf ökologischen Landbau als Alternative wird nicht betrachtet. Das gilt umso mehr in den Szenarien, die mit erheblichen Mengen an Agroenergie kalkulieren, die unter massiven Düngereinsatz erzeugt werden (Ch2: 34). Ähnliches gilt für Methan (CH₄) Emissionen (kritisch wegen der hohen Emissionsmengen), die die Modelle ebenfalls nur teilweise abbilden können. Dabei steigt der Anteil der Land- und Forstwirtschaft (wohl überwiegend aus Nassreisbau und Rinderhaltung) von rund der Hälfte bis 2050 auf rund 2/3 bis 3/4 der Emissionen. Eine detaillierte Analyse der Fortschritte im Reisanbau (e.g. Kritee et al. 2018; Chirinda et al. 2018) oder der Folgen einer Umkehr des Trends zu zunehmendem Rindfleischkonsum wurde nicht durchgeführt (Ch2: 36).

Aufforstung und Wiederbewaldung

Die weltweiten Waldbrände im Sommer 2019 haben die Bedeutung des Waldes als ökologischer Regulationsfaktor erneut ins öffentliche Bewusstsein gehoben. Wälder speichern nicht nur große Mengen Kohlenstoff, oberirdisch (besonders tropische Regenwälder wie der Amazonas) oder unterirdisch (besonders boreale Wälder z. B. in Sibirien), sie sind auch Heimstatt vieler Arten und regulieren das globale Klima. Gerade in den Wäldern der borealen Zone, die aufgrund der Stauwirkung der unterliegenden Dauerfrostböden und den geringen Verdunstungsraten oft vermoort sind, findet eine starke CO₂-Bindung statt. Dabei ist der Flächenbedarf bei Verfahren, die auf CO₂-Bindung durch Pflanzenwachstum abzielen, generell sehr hoch.

Naturwälder: Die erste Forderung zur Waldbewirtschaftung ist daher ein grundsätzlicher Schutz aller verbliebenen Naturwälder sowie aller Wälder, deren Baumbestände ein Alter von 150 Jahren oder mehr aufweisen (Luyssaert et al. 2008).

Wiederbewaldung: Laut FAO (2016) sind in den letzten 5000 Jahren 1,8 Mrd. ha Fläche entwaldet worden, das sind rund 50% der heutigen Waldfläche. Wir unterstützen daher die Idee, waldfähige Flächen so weit wie möglich wieder aufzuforsten, und zwar mit Baumartenzusammensetzungen, die dem Artenspektrum der jeweiligen Naturwälder entsprechen, insbesondere weil dies dem Schutz der biologischen Vielfalt dient (Ch3: 160; IPBES 2019). Das gilt insbesondere für die akut bedrohten tropischen Wälder, die ständig Waldfläche an die Landwirtschaft verlieren, oft für Weideland oder den Anbau von Soja, Zuckerrohr und Ölpalmen für Exporte nach Europa.

Aufforstung: Aufforstung ist ein zweischneidiges Schwert – die Aufforstung von Grasland-Ökosystemen oder (noch) diversifizierter Agrarlandschaften mit Monokulturen oder (invasiven) ortsfremden Arten kann signifikante negative Folgen für die biologische Vielfalt haben, während die Aufforstung mit standortgerechten Baumarten (unter Berücksichtigung des Klimawandels) und Agro-Forst-Systeme die biologische Vielfalt schützt, zur Sicherung des Wasserhaushalts beiträgt und Hochwasser als Folge von (infolge des Klimawandels vermehrt auftretenden) Starkregen verringert (Ch4: 343). Diese Vorteile kann keine andere Form der Kohlenstoffbindung bieten. Werden dagegen aus ökonomischen Gründen und zur Maximierung der CO₂-Bindung schnellwachsende Baumarten angebaut, Rotationszeiten verkürzt oder das Restholz nicht im Wald belassen, ergeben sich negative Folgen für die Biodiversität (Ch3: 160; IPBES 2019) und zukünftige Wachstumspotenziale. Äste, Borke und Blätter/Nadeln stellen zwar nur rund ein Drittel der nutzbaren Biomasse dar, aber ihre Entnahme erhöht die Verluste an N und P um das dreifache, und die von K, Ca und Mg um das drei- bis fünffache (Engel 2007). Schon heute ist eine signifikante Reduktion von P, Mg und K in den Bäumen zu beobachten, die zusammen mit dem N/P Ungleichgewicht zu reduzierten Wachstumsraten beitragen (Flückinger,

Braun 2009). Die zur Kompensation erforderlich verstärkte Düngung der Wälder würde ihrerseits wieder zu Treibhausgasemissionen beitragen, durch den Energieeinsatz sowie durch die Ausgasung von N₂O.

Zudem können auch große Aufforstungsprojekte nur einen Teil der jährlichen Emissionen binden – ein Drittel nach Bastin et al. (2019), die ein zusätzliches Potential für 900 Mio. ha Waldfläche bestimmt haben (derzeitige Waldfläche weltweit ca. 4.000 Mio. ha – sinkend). Unter diesen Annahmen könnten 750 Gt CO₂ in (wieder) aufgeforsteten Wäldern gespeichert werden. Dies zeigt, dass Wälder ein hohes Potential haben, um als CO₂-Speicher wirken zu können. Die (Re)konstruktion von Naturräumen ist daher eine allererste Option des Klimaschutzes, zumal hier auch viele andere Naturfunktionen, Biodiversität, Grundwasserbildung bis hin zu Erholungsfunktionen einhergehen. Allerdings sollten die Potenziale auch nicht überschätzt werden: unter Berücksichtigung sozial-ökologischer Bedingungen sind die verfügbaren Flächen weitaus kleiner als oft angenommen (Fuss et al. 2018). Tatsächlich werden die sozio-ökonomischen Folgen großer Aufforstungen meist ignoriert; werden sie überwacht, sieht man, dass sie weit überwiegend negativ sind (Malkamäki et al. 2018). Das gilt insbesondere für die „verborgenen Emissionen“ der Aufforstung, d. h. Emissionen andernorts infolge landwirtschaftlicher Intensivierung, von Brennholzsubstitution, und infolge der Vertreibung vom angestammten Land, die die positiven Klimaeffekte einer Aufforstung deutlich überkompensieren können (Gingrich et al. 2019). Die Aufforstung von Wäldern sowie die Verhinderung der Rodungen und des Abbrennens sind dennoch – bei allen Restriktionen und Randbedingungen – ein zentraler Bestandteil von Klimaschutz-Strategien.

Sinnvoller als Holz in BECCS-Verfahren einzusetzen wäre es Holz erst zu verbrennen, nachdem es zuvor stofflich genutzt wurde. Dann wirkt Holz nicht nur

als Speicher, sondern ersetzt auch den Einsatz von Beton und Zement und Heizenergie beim Bau von Gebäuden als Baumaterial oder Dämmmaterial. Erst nach erfolgter stofflicher Nutzung der durch Sonnenenergie erzeugten hohen materiellen Qualität von Biomasse ist es kein Problem die Reste als Altholz oder Biogas aus Abfällen zu verfeuern, natürlich in höchster Effizienz mit Kraft-Wärme-Kopplung. Die Speichermöglichkeiten in Holzprodukten können lokal relevant sein, sind aber global sehr begrenzt (Johnston, Radeloff 2019). So beträgt die durchschnittliche Lebensdauer sogenannter langlebiger Holzprodukte in Deutschland ca. 50 Jahre, eine Zeitdauer (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt 2017), die mit der Lebensdauer eines lebenden Baumes nicht mithalten kann.

Fazit:

Betrachtet man die Methoden der negativen Emissionen genauer, stellt man fest, dass deren Gesamtpotential im Bereich von 10–20% der jährlichen Emissionen liegt, oder etwa dem Anstieg der CO₂-Emissionen der vergangenen 10–20 Jahre. Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind also weder ausreichend wirksam noch sozial und ökologisch unproblematisch. Techniken deren gefährliche Auswirkungen und Risiken heute schon erkennbar sind oder die hohe energetische Ineffizienz aufweisen, sollten daher kein valides Instrument in Klimastudien (mehr) sein. Gleichzeitig werden andere, aus unserer Sicht eher nachhaltigkeitskompatible Handlungsoptionen entweder gar nicht erwähnt, oder sie finden aufgrund der Schwächen der IAM-Modelle keinen Eingang in die Szenarien.

3. Vergessene Handlungsfelder: Senken

Allgemein kann man sagen, dass natürliche Prozesse vielfach von Nutzen für die Begrenzung der Klimakrise sind, und dass ihre verstärkte Nutzung immer dann sinnvoll ist, wenn nicht dadurch – z. B. durch die Größe der Vorhaben – nicht-intendierte ökologisch bedenkliche Effekte auftreten. Dazu zählt auch die Renaturierung von in der Vergangenheit degradierten Ökosystemen. In diesem Abschnitt benennen wir – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – eine Reihe von Maßnahmen, die, anders als die vom IPCC genannten, atmosphärisches CO₂ binden, ohne die Integrität von Ökosystemen zu gefährden.

Moore

Moore stellen unter den Landlebensräumen besonders potente CO₂-Senken dar, solange sie ihre natürliche Dynamik nicht verloren haben. Degradierete Moore, besonders solche, die in landwirtschaftliche Flächen umgewandelt wurden, gehören hingegen zu den stärksten CO₂-Emittenten im Bereich der Landwirtschaft (Parish et al. 2008; Drösler et al. 2009; Leifeld, Menichetti 2018). Deshalb muss es Ziel sein, jede Moorfläche, die noch ein Potential zur Renaturierung aufweist, in einen natürlichen Zustand zurückzubringen (Harenda et al. 2018). Die Regeneration natürlich wachsender Moore, insbesondere Hochmoore, muss auch Vorrang vor Nutzung von Moorflächen durch Paludikultur haben. Paludikultur ist zwar ein Fortschritt gegenüber konventioneller Landnutzung auf Moorflächen, bietet in der Regel aber nicht das Potential für eine dauerhafte CO₂-Deposition. Darüber hinaus ist ein weltweites Moratorium zum Torfabbau dringend erforderlich.

Steppen

Auch Savannen, Steppen und sogar Halbwüsten spielen als CO₂-Senke eine erhebliche Rolle (Dass et al. 2018; Song et al. 2018). Allerdings sind Hochgrassteppen mit fruchtbaren Schwarzböden heute fast vollständig in Ackerbaugebiete umgewandelt worden, die für die Ernährung der Weltbevölkerung unver-

zichtbar scheinen. Weniger fruchtbare Steppenbereiche müssen weiterhin als Grasland erhalten bleiben (t Mannetje et al. 2008). Die Überweidung und damit verbundene Degradierung und Minderung der CO₂-Fixierung muss durch eine Beschränkung der Viehmengen deutlich reduziert werden.

Ökologischer Landbau und Agroforestry

In der Diskussion erwähnt, aber in den Szenarien nicht abgebildet, ist der Ökolandbau; nicht erwähnt wird die artgerechte Tierhaltung. Das trägt dazu bei, dass in allen Szenarien signifikante Methan- und Ammoniak-Emissionen aus der Tierhaltung angenommen werden, sowie Treibhausgasemissionen aus dem Landbau infolge NPK-Düngereinsatz, die sich noch erhöhen wenn zusätzlich zur Nahrungsmittelproduktion industrielle Biomasse produziert werden soll (Agro-Energie – mit infolge Düngung fragwürdiger Energiebilanz, s.o.).

Leistungen des Ökolandbaus die berücksichtigt werden müssen, liegen insbesondere in den Bereichen deutlich höherer Kohlenstoffspeicherung im höheren Humusgehalt der Böden und bei der verringerten Lachgasemission (Sanders, Heß 2019). Artgerechte Tierhaltungssysteme zeichnen sich durch mehr Platzbedarf in der Haltung und Fütterung aus, die bei Wiederkäuern in erster Linie auf der direkten Verwertung des Aufwuchses des Graslandes beruht. Der Anbau von Futter im Ackerbau mit seinen höheren Emissionen an Lachgas wird deutlich reduziert. Derartige (flächengebundene) Tierhaltung in Kombination mit der Reduktion des Konsums tierischer Lebensmittel fehlt als Beitrag in der Modellierung.

Fleischkonsum ausschließlich aus artgerechter Tierhaltung und heimischer Produktion bedeutet auch seine deutliche Reduzierung – was gleichzeitig ein Beitrag zu einer gesünderen Ernährung und damit zur Senkung der Gesundheitskosten, privat wie öffentlich, wäre.

4. Vergessene Handlungsfelder: Quellen

Suffizienz

Suffizienz ist notwendig um Effizienz effektiv zu machen. Zwar konstatiert das IPCC, dass nachfrage-seitige Maßnahmen zentrale Elemente von 1,5 ° kompatiblen Entwicklungspfaden sind, beschränkt sich dabei aber weitgehend auf Änderungen des Konsumverhaltens, ohne auf die dafür notwendigen Bedingungen näher einzugehen. Bedingungen für die Änderung sozialer Praxen sind aber rechtliche und soziale Regeln, Infrastrukturen etc. (Shove, Walker 2010; Rijnhout, Mastini 2018). Ohne diese führt ein weniger an Ressourcenkonsum leicht zu einem weniger an Lebensqualität und ist in einer Konsumgesellschaft schwer zu realisieren (Speck, Hasselkuss 2015). Zudem sind die meisten derartigen Umstellungen in den Modellen nicht oder nur begrenzt und indirekt ausdrückbar.

Nachhaltiger Konsum

Es ist seit langem bekannt, dass die wesentlichen Konsumbereiche, in denen die Haushalte zur Umweltbelastung beitragen, Bauen und Wohnen, Ernährung und Mobilität sind (Spangenberg, Lorek 2002). Wir werden in dieser Sektion u. a. einen kurzen Blick auf jeden dieser Bereiche werfen und die vorhandenen Suffizienz-Potenziale zumindest kurz andeuten. Der SR15 Bericht weist mehrfach darauf hin, dass Verhaltensänderungen der Konsument*innen einen wichtigen Beitrag zur Minderung der Klimaschäden leisten können (im Bereich Landnutzung jeweils 40 % in der Produktion (durch optimierte Landwirtschaft und verringerte Waldzerstörung) und im Konsum (durch Ernährungsumstellung und die Vermeidung von Lebensmittelabfällen, Ch2: 6) im Vergleich zum Basisszenario (Ch2: 70). Leider werden diese Suffizienzoptionen in den Modellierungen und damit in den Szenarien nicht berücksichtigt.

Dabei haben aktuelle Studien gezeigt, dass Konsumsuffizienz zusätzlich zur Produktionseffizienz auch in anderen Bereichen ins Kalkül zu ziehen eine wichtige Voraussetzung für die Erreichung der Klimaziele des

Pariser Abkommen ist (Mundaca et al. 2019; Wachsmuth, Duscha 2019; Wilson et al. 2019), auch um Rebound-Effekte zu egalisieren, und dass Konsumänderungen durch geeignete Politiken stimuliert werden können (Keller et al. 2016; Hargreaves 2011).

Energie

Unter der Annahme 100% erneuerbare Energie, die in den Modellen nicht vorkommt, und damit vollständiger Ausstieg aus der Verbrennung oder industriellen Nutzung fossiler Materialien, sinken die verbleibenden CO₂-Emissionen und mit ihnen der Bedarf an negativen Emissionen. Dies, in Verbindung mit allgemeiner Ressourceneinsparung (und damit sinkendem Energiebedarf in Transport, Verarbeitung, Nutzung und Entsorgung/Aufbereitung zur Wiederverwendung/Verwertung) ermöglicht den Verzicht auf die unterschiedlichen CCS-Verfahren (UBA 2018; 2019), wie auch das LED Szenario des IPCC nahelegt. Ein beschleunigter Übergang zu einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung ist auch notwendig, um überhaupt noch das für den Umbau des Systems erforderliche CO₂-Budget verfügbar zu haben (Sers, Victor 2018).

Ernährung

Wie bereits erwähnt, wird eine zukunftsfähige Landwirtschaft deutlich weniger Fleisch produzieren, das dann von höherer Qualität, aber wie andere Agrarprodukte auch teurer ist, und so den ökologisch wirtschaftenden Bauern eine sichere Existenzgrundlage bieten. Die höchsten Treibhausgasemissionen entstehen bei der intensiven Rinderhaltung – eine Verringerung des Rindfleischkonsums, aber auch der Milchprodukte, auf die Menge, die in artgerechter Tierhaltung von Weidevieh produziert wird, wäre ein wichtiger Schritt (grasende Huftiere leisten einen wichtigen Beitrag zu Bodenqualität und -biodiversität, was wiederum CO₂ fixiert) – Weidehaltung bedeutet Grünlandschutz und damit Klimaschutz (Idel, Beste 2018). Schafe und Ziegen folgen in der

Reihenfolge der emissionsintensiven Nutztiere, während Schweine und Hühner den letzten Platz belegen (Bowles et al. 2019; IPCC 2019). Beim Fleischkonsum geht es also um beides, die Verringerung des Gesamtkonsums und die Umstellung des Konsumspektrums (natürlich sind vegetarische und vegane Ernährungsweisen in dieser Hinsicht auch hilfreich). Zusammen mit der Vermeidung von Lebensmittelabfällen führt das dazu, dass im IPCC LED „pathway“ auch bei Fast-Einhaltung des 1,5 °-Budgets (es wird noch Kohleverbrennung angenommen!) keine zusätzlichen Flächen für Energiepflanzen benötigt werden (Ch2: 71–72). Die potenziellen positiven Beiträge der Ökolandwirtschaft (Sanders, Heß 2019) finden jedoch keinen Eingang in die Szenarien, ebenso wenig wie die Notwendigkeit, die Resilienz der Landwirtschaft gegenüber den Folgen des Klimawandels zu stärken, auch wenn das ggf. eine Abkehr von der Monokulturlandwirtschaft bedeuten würde, die heute schon zu sinkenden Erträgen unter Klimastress führt (Kahiluoto et al. 2019).

Mobilität/Verkehr

Für uns gilt nach wie vor die Hierarchie von Verkehrsvermeidung vor Verlagerung (modal Split) vor Verbesserung (Effizienz, Elektrifizierung). Die energetisch schlechteste verfügbare Option besteht in der direkten Extraktion von CO₂ aus der Luft, um das CO₂ zur Herstellung künstlicher Kraftstoffe zusammen mit Wasserstoff aus der mit erneuerbarem Strom betriebenen Elektrolyse zu verwenden. Der energetische Aufwand ist hoch – für 1 kWh in Form von künstlichem Kraftstoff (Power-to-liquid) ist der Einsatz von 3–4 kWh Strom erforderlich. Wird dieser Kraftstoff in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt, resultiert eine Antriebsenergie von nur 0,25 kWh. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Kette liegt somit unter 10 % und damit deutlich unter dem Einsatz von Stromantrieben. Eine Umstellung des Verkehrsbereiches von fossilen auf künstliche, mit EE Strom hergestellte Kraftstoffe würde 500–1000 TWh zusätzli-

che Stromerzeugung erfordern, die in Deutschland nicht darstellbar ist. Sinnvoller ist die Umsetzung von Energieeffizienz der Fahrzeuge v. a. durch elektrische Antriebe (mit Rückgewinnung).

Elektrifizierung ist aber auch keine Patentlösung, und ein 1:1 Ersetzen von fossilen durch Elektromobile ist weder möglich noch wünschenswert – während auch beim gegenwärtigen Energiemix die CO₂-Emissionen sinken würden, würde der Ressourcenkonsum steigen, Lärm und Unfälle blieben unverändert. Vorrang sollte deshalb eine Mobilitätswende einschließlich der Förderung des nicht motorisierten Verkehrs und einer flächendeckenden Elektrifizierung von Bahnen und Bussen haben.

Bauen und Wohnen

Emissionen Bauphase: Bauen für Industrie, Gewerbe und Wohnungen erfordert hohe Mengen an Zement und Beton, die einen der größten Stoffströme darstellen und deren Herstellung bereits jetzt signifikante Emissionen von Treibhausgasen erzeugt. Dies beruht nicht nur auf dem dabei unvermeidlichen Energieverbrauch, sondern insbesondere darauf, dass Calciumcarbonate in gebrannten Kalk überführt werden müssen, wobei das in den Carbonaten gebundene CO₂ freigesetzt wird. Stein und Beton durch alternative (organische) Baumaterialien zu ersetzen, hat demgegenüber energetische Vorteile, ist aber mit eigenen Problemen verbunden. Insbesondere die Flächeninanspruchnahme steht nicht nur in Konkurrenz zu anderen Nutzungsansprüchen, sondern insbesondere zu dem Ziel, den Flächenverbrauch zu beenden.

Emissionen Nutzungsphase: Rund ein Viertel des Endenergieverbrauchs in Europa entfällt auf Haushalte; zwei Drittel davon für Niedertemperaturwärme zur Raumheizung (gut 10 % für Warmwasser, 5 % für backen und kochen, knapp 20 % für Elektrogeräte und Licht (Odyssee Database 2017). Nach wie vor ist die Gebäudeisolierung nicht ausreichend umgesetzt, obwohl hier erhebliche Einsparungen im Energiever-

brauch und bei Heizkosten möglich wären. Während die Einsparpotenziale (und die zusätzlichen qualifizierten Arbeitsplätze) durch Optimierung der Bausubstanz bekannt und es am politischen Willen mangelt, diese auszuschöpfen, wird der verhaltensbasierte Beitrag meist unterschätzt. Er kann bis zur Hälfte des Haushaltsenergieverbrauchs ausmachen (Wohnraumtemperatur, Lüftungszeiten, Warmwassernutzung etc.) und erfordert soziale Innovationen, um mobilisiert zu werden (Vorbilder, Freund*innen, Kolleg*innen, Kommunikation). Die stetig zunehmende Wohnfläche pro Person stellt ein weiteres Problem dar, das sowohl auf den demographischen Wandel (Zunahme der Ein-Personen-Haushalte) wie auf gesteigerte Ansprüche an die verfügbare Wohnfläche zurückgeht.

Flächenverbrauch: Der BUND hat nicht nur das Ziel, die CO₂-Emissionen bis 2040 auf Null zu fahren, sondern auch den Flächenverbrauch bis 2030 zu beenden – zwei Zielstellungen, die sich ergänzen. Das heißt die Umwandlung von Acker-, Forst- und Naturflächen in Siedlungs-, Wohn- und Wirtschaftsflächen zu beenden – Baugebiete werden in aller Regel als Erweiterungen bereits bestehender Siedlungen angelegt, die ursprünglich in fruchtbaren, landwirtschaftlich nutzbaren Gebieten gegründet wurden und nicht in wüstenhaften, unproduktiven Regionen. Es beinhaltet das Ende von Einkaufszentren „auf der grünen Wiese“, Beschränkung des Flächenverbrauchs von Logistikzentren, der durch den Übergang zur vollständig ebenerdigen Bauweise massiv gestiegen ist (da kann IT helfen mehretägige Lager zu managen), verdichtete Stadtbauweise in Siedlungsräumen, verbesserte Energieeffizienz von Gebäuden in Zusammenarbeit von öffentlichen und privaten Akteuren mit den Immobilienbesitzer*innen (Trotta et al. 2018), Begrenzung der ständig wachsenden Wohnfläche pro Kopf (Lorek, Spangenberg 2019), Förderung von kollektiven Lernprozessen und Eröffnung von Möglichkeitsräumen, statt erzieherischer Energiesparkampagnen (Spangenberg, Lorek 2019).

5. Die IAM Modelle – undurchsichtig, unterkomplex, ungeeignet

Bei den ökonomischen Komponenten der Integrated Assessment Modelle (IAMs) handelt es sich in aller Regel um globale oder regionale (partielle) Gleichgewichtsmodelle (CGE und DSGE Modelle), die auf eine Vielzahl von extern gesetzten Annahmen angewiesen sind (Ch2: 8; 12; Ch2 SM: 15), die nicht von den Modellergebnissen beeinflusst werden können und die fast nie explizit ausgewiesen werden. Da von einem angenommenen Gleichgewicht ausgehend, sind solche Modelle strukturell ungeeignet, Ungleichgewichtsprozesse abzubilden – und um solche handelt es sich bei Klimakrise, Biodiversitätsverlust etc. (Ciarli, Savona 2019).

Nicht nur die Konsumseite, auch Institutionen, Politikprozesse etc. bleiben trotz ihrer erkannten Relevanz außen vor, weil ihre Integration solche Modelle überfordern würde (Ch2SM: 15). Deswegen verlassen sie sich nahezu ausschließlich auf ökonomische Instrumente (Ch2: 12) und optimieren die Ergebnisse unter Kostengesichtspunkten, ohne alle Kapitalkosten für Strukturinvestitionen, vor allem aber ohne die positiven Aspekte wie vermiedene Schadenskosten, bessere Gesundheit und vielfältige Politikinterventionen angemessen zu berücksichtigen (Spangenberg, Polotzek 2019). Das politische Umfeld spielt nur insofern eine Rolle, als es durch Steuern oder Subventionen die Profitabilität der Bioenergie beeinflusst (Ch2SM: 16). Zudem wird eine idealisierte Form der ökonomischen Wirkmechanismen angenommen, indem die vielzitierten Rebound-Effekte in den Modellierungen nicht berücksichtigt werden (Ch2SM: 15), die Wirkung der Instrumente also deutlich überschätzt wird (Holm, Englund 2009; Santarius, Soland 2018). Diese ökonomische Optimierung ohne Berücksichtigung der Klimaschäden hat schwerwiegende Folgen. So konstatiert das IPCC zwar, dass es eine wachsende Fülle von Szenarien gibt, die auf 100% erneuerbare Energien setzen, stellt aber lapidar fest, dass keine der IAM-Projektionen 100% Erneuerbare als kostengünstigen Entwicklungspfad betrachtet (und diese Option deshalb unberücksichtigt bleibt). Statt dessen enthält der Energiemix der meis-

ten Szenarien einen Anteil der vorgeblich CO₂-freien Atomenergie – die nicht ohne CO₂-Emissionen auskommt, die bekannten Betriebs- und Endlagerisiken beinhaltet, ein Netz erfordert, das ein Handicap für dezentral Erneuerbare ist, Kapital langfristig bindet, das für Energiesparen und Erneuerbare dringend gebraucht wird und – selbst wenn man all diese Probleme beiseite ließe – aufgrund der langen Bauzeiten schlicht zu spät käme, um den Klimawandel zu bremsen.

Das Ergebnis wird dadurch weiter verzerrt, dass IAMs häufig annehmen, dass Wirtschaftswachstum und steigender Wohlstand zu einer Verringerung der Umweltbelastung führen würden, man also aus einer Umweltkrise „herauswachsen“ könne (Ch2SM: 15). Diese sogenannte „Environmental Kuznets Curve“ Hypothese war unter neoklassischen Umweltökonomien in den 1990er sehr populär, kann aber heute als lange widerlegt betrachtet werden (z. B. Ekins 1997; Fischer-Kowalski et al. 2001; Spangenberg 2001).

Eine weitere Schwäche der ökonomischen Modelle betrifft den ureigensten Bereich der Ökonomik, die Abschätzung der zukünftigen Kosten. Hier gehen die IPCC-Ökonomen davon aus, dass in der Wertschätzung der Allgemeinheit der Wert zukünftiger Ereignisse umso geringer ist, je weiter diese entfernt sind, und zwar um ca. 5% pro Jahr (Ch2SM: 14). Das ergibt eine Exponentialfunktion, die Schäden gegen Ende des Jahrhunderts nahezu marginal werden lässt (kurzfristige Ausgaben für die Vermeidung langfristiger Kosten erscheinen so unwirtschaftlich, wie z. B. bei Nordhaus 2019). Das wiederum beeinflusst den Zeitpunkt der Emissionsreduzierungen, denn bei einer höheren ökonomischen Diskontrate wird der Einsatz kapitalintensiver Optionen wie den erneuerbaren Energien auf spätere Zeitpunkte verschoben (Ch2SM: 14). Als Folge sind die vorgeschlagenen CO₂-Bepreisung viel zu gering, um bis 2050 Nullemissionen zu erreichen, und „Overshoot“ und „negative Emissionen“ werden zu einer angeblichen ökonomischen Notwendigkeit, die die meisten Szenarien aufgrund der gemachten Annahmen ableiten. Eine solche

⁶ Governance factors are usually not explicitly accounted for in IAMs, obwohl „transition governance [...] has been shown to lead to potentially different mitigation outcomes“ (Ch2SM: 14).

Abwertung der Zukunft ist – anders als der Mainstream der Wirtschaftswissenschaften annimmt – keine den Wertvorstellungen der Menschen angemessene Vorgehensweise: für bestimmte Dinge kann der Wert konstant sein (was ist der Wertverlust eines Berges zwischen diesem und dem nächsten Jahr?), und die gesellschaftliche Wahrnehmung von Werten folgt eher einer hyperbolischen als einer exponentiellen Entwicklung (Gowdy et al. 2013). Das ignorieren alle IPCC-Szenarien – sie unterscheiden sich in dieser Hinsicht nur durch die Höhe der Koeffizienten der Exponentialfunktion; in der Szenario-Datenbank liegen sie zwischen 2% und 8% p.a. (Ch2SM: 14), in der IIASA Datenbank mit ihren 900 Szenarien alle bei 5%. Dies ist doppelt widersinnig: einerseits, wenn man schon eine Discountrate als Ausdruck gesellschaftlicher Wertzumessung bestimmt, dann sollte sie zwischen 0 und maximal 2% liegen, wie auch der Stern Report betont. Zum anderen spiegeln die 5% noch nicht einmal die gegenwärtigen Marktzinsen, also das reale Wirtschaftsgeschehen unter Vernachlässigung der sozialen Komponente, denn diese liegen schon seit Jahren zwischen 0 und 1,5%; teilweise sind sie sogar negativ.

Mit solchen Exponentialfunktionen sind auch typische Eigenschaften komplexer entwicklungsfähiger Systeme nicht erfassbar, wie Ungewissheit und Nichtwissen (stochastische „Verschmierungen“ in sogenannten „fuzzy models“ stellen Risiken dar, die mathematisch berechenbar und damit deterministisch sind, also nicht ungewiss). Die Modellierung mit stetigen Funktionen führt auch dazu, dass die Modelle Kippunkte nicht berücksichtigen können – zum einen sind diese Unstetigkeitsstellen, an denen eine marginale Veränderung der unabhängigen Variable zu großen und nicht vorhersagbaren Veränderungen der abhängigen Variablen führt, zum anderen ist ihr Auftreten von Ungewissheit und Nichtwissen gekennzeichnet. Eine Folge dieser Situation ist, dass die Modelle – wie das IPCC mehrfach hervorhebt – nicht in der Lage sind, die Folgen eines veränderten Klimas

für Wirtschaft, Wachstum und Gesellschaft zu berücksichtigen (u. a. Ch2: 12; 24). Als Grundlage für politische Entscheidungen sind sie daher unbrauchbar, weil sie die Risiken und Folgen der Klimakatastrophe systematisch unterschätzen.

In Anbetracht all dieser Probleme ist die Frage nahe liegend, warum diese Modelle trotzdem überhaupt benutzt werden. Die Antwort ist eine doppelte: zum einen sind sie die einzigen Modelle, die Vorhersagen bis Ende des Jahrhunderts und darüber hinaus treffen, also das passende Pendant für die langfristigen Klimamodelle. Andere Modelle, die es zulassen, dass die Rückwirkungen der Prozesse strukturverändernd sind (systemdynamische, agentenbasierte und evolutionäre Modelle) ergeben für 20 bis 30 Jahre relativ konsistente Ergebnisse (Lamperti et al. 2018), aber danach divergieren die Resultate bei jedem Modellauf so stark, dass man recht sicher sagen kann, dass ökonomische Prognosen von mehr als 30 Jahren noch nicht einmal Science Fiction sind, sondern einfach nur Fiktion (was impliziert, dass schon die Fragestellung nach ökonomischen Langfristprognosen falsch ist).

Positiv ist dabei, dass realitätsnähere Modelle zur Verfügung stehen, die den Zeitraum abdecken, in dem die Transformation zur Nachhaltigkeit gelingen muss, sollen die vergangenen und kommenden Bemühungen nicht verlorene Liebesmüh gewesen sein (Ciarli, Savona 2019). Die schlechte Nachricht ist, dass IAMs eine dominante Rolle spielen und damit reine Spekulationen ohne wissenschaftlichen Wert als Grundlage der Politikentwicklung dienen (makroökonomische Modelle in Keynesianischer Tradition teilen viele Eigenschaften und schneiden daher nur unwesentlich besser ab). Manski (2019) fasst die Situation präzise zusammen: „exact predictions of policy outcomes are routine, while expressions of uncertainty are rare. However, predictions and estimates often are fragile, resting on unsupported assumptions and limited data. Therefore, the expressed certitude is not credible“.

Geheimsache Degrowth

Auch wenn die Autoren des IPCC-Berichts immer wieder betonen, dass die Wachstumsraten ein zentraler Parameter aller Szenarien sind (z. B. Ch2: 24), sucht man Angaben über die Wachstumsraten vergeblich im Bericht, den Supplementary Materials und der Szenario Datenbank (Kurz et al. 2019). Was man zumindest in den empfohlenen Quellen (ein Journal Special Issue) klar beschrieben findet (u. a. Riahi et al. 2017), ist die Information, dass im SR 15 Wachstum als reales, kaufkraftbereinigtes Wachstum pro Kopf gemessen wird, in Preisen von 2005 – Angaben, die mit anderen Quellen kaum vergleichbar sind. Mehr Klarheit schafft der Beitrag von Leimbach et al. (2017), der erläutert dass das berechnete Wachstum des Welt-BIP nach der IPCC SR 15 Methode von 48,7 Billionen US\$ im Jahre 2000 je nach Szenario auf 309 (SSP3) bis 906 (SSP5) im Jahre 2100 ansteigt, also um einen Faktor 6 bis 20. Das ist wie eben ausgeführt Fiktion, aber der Vergleich mit den üblichen Zahlen ist dennoch interessant: unter der Annahme eines konstanten Verhältnisses von kaufkraftbereinigten und normal berechneten Werten sind die erwarteten Wachstumsergebnisse nur noch rund halb so hoch (150 bzw. 550 Billionen US\$, Faktor 3 bis 11). Während also die Weltwirtschaft nach den Annahmen des IPCC weiterhin stark wachsen wird, sieht es auf regionaler Ebene anders aus: in den auf dem Shared Socioeconomic Pathway SSP 3 beruhenden Szenarien sinkt das BIP in absoluten Zahlen für fast alle Hochinkommensländer; unter den Annahmen von SSP1 und SSP4 (und damit in der Mehrheit der Fälle) gilt dies zumindest für Japan, Korea, Taiwan, Osteuropa und insbesondere China (Leimbach et al. 2017). Ursache ist die schrumpfende Erwerbsbevölkerung bei gleichzeitig begrenzten Produktivitätsfortschritten. Wie sich diese Entwicklung auswirken wird, bleibt offen – so könnte ein sinkendes BIP die Finanzierbarkeit der Klimapolitik beeinflussen (oder, wenn Klima Priorität erhält, andere Ausgabenfelder, die für eine sozial-ökologische Transformation wichtig sind).

Gleichzeitig könnten sich die Ängste vor neuer Arbeitslosigkeit als unbegründet erweisen, wenn die Erwerbsbevölkerung in der gleichen Größenordnung schrumpft wie das Arbeitsangebot – dann wären Ausbildung von Migrant*innen und Fortbildung älterer Arbeitnehmer*innen das Gebot.

Nach der Mehrheit der Szenarien ist ein Schrumpfen der Wirtschaft in weiten Teilen Europas zu erwarten (Bonaiuti 2017), aber Vorschläge für eine Strategie der sozial-ökologisch nachhaltigen Gestaltung der wirtschaftlichen Kontraktion sucht man vergeblich. Diese zentralen Fragen nach einem zukunftsfähigen Wohlfahrtsstaat werden nicht diskutiert – damit wurde eine Chance vertan.

6. Ausblick

Die Begrenzung der Klimakatastrophe und die Transformation zu einer zukunftsfähigen Wirtschaft und Gesellschaft erfordern wirksames globales Handeln. Wirksames Handeln verlangt von den Industriestaaten Europas Strategien, die anerkennen, wie grundlegend der Wandel von Form, Funktionsweise und Produkten von Wirtschaft und Konsum sein muss. Er reicht von der Ernährung über die Mobilität bis zur Zukunft der Arbeit, von Verkehr über Chemie zur Bauwirtschaft, von lokalen Unternehmen und Netzwerken bis zum Welthandel (dessen Bedeutung wohl in Zukunft weiter abnehmen wird (Wiedmann, Lenzen 2018)). Globales Handeln bedeutet (auch aber), nicht nur Standards in den Lieferketten durchzusetzen, sondern Politiken, Konsummuster und Technologien auf ihre Globalverträglichkeit hin zu prüfen – das gilt insbesondere für alle großskaligen technologischen Ansätze, insbesondere Geoengineering, die über unterschiedliche Formen von Telecoupling alle Regionen der Welt beeinflussen. Auch aus internationaler Verantwortung kommt es darauf an, bis 2040 in Deutschland und weiten Teilen Europas eine Wirtschaftsstruktur aufgebaut zu haben, die ohne fossile Brennstoffe auskommt, diesen Umbau aber auch mit Handelspartnern zu diskutieren, die bisher vom Export nach Europa abhängig sind und ihre Argumente bei der Gestaltung der Transformation mit zu berücksichtigen (Biermann, Möller 2019). Werden diese Maßnahmen integriert umgesetzt, einschließlich der Kohlenstoffbindung in gesunden Wäldern, Böden und naturnaher Landwirtschaft, und einem diesen Zielen angepassten Konsum, dann ist auch Geoengineering unnötig und ein (zeitweises) Überschreiten der CO₂-Budgets mit all den genannten Risiken kann auch ohne die genannten, ökologisch riskanten Ansätze vermieden werden (Ch3: 160).

7. Quellen

Angaben zu Fundstellen im 2018 IPCC-Report „Global Warming of 1.5 °C“: (Chx: y) besagen, dass die entsprechende Aussage auf Seite y des Kapitels x zu finden ist. (ChzSM: y) verweist auf die Seite y im Supplementary Material zu Kapitel z.

Alfredsson, E., Bengtsson, M., Brown, H.S., Isenhour, C., Lorek, S., Stevis, D., Vergragt, P. 2018. Why achieving the Paris Agreement requires reduced overall consumption and production. *Sustainability: Science, Practice and Policy* 14(1): 1–5.

Allen, P. M. (1998). *Evolutionary Complex Systems and Sustainable Development. Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development.* J. C. J. M. van den Bergh, Hofkes, M. W. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers: 67–100.

Ausfelder, F., Dura, H.E. (Hrsg.). 2019. Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien – 1.Roadmap des Kopernikus-Projektes Power-to-X. Frankfurt am Main, DECHEMA.

AWI (2014): Carbonate counter pump stimulated by natural iron fertilization in the Polar Frontal Zone. *Nature geosciences*.

Bakker, D.C.E., Watson, A.J., Law, C.S. 2001. Southern Ocean iron enrichment promotes inorganic carbon draw-down. *Deep Sea Res., Part II: Topical Studies in Oceanography* 48: 2483–2507.

Bar-Yam, Y. (1997). *Dynamics of complex systems.* Reading, Massachusetts, Addison Wesley.

Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C.M., Crowther, T.W. 2019. The global tree restoration potential. *Science* 365(6448): 76.

BAuA Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Ausschuss für Gefahrstoffe. 2016. Technische Regeln für Gefahrstoffe: Teer und andere Pyrolyseprodukte aus organischem Material (TRGS 551), Fassung vom 2.2.2016, Bekanntmachung, GMBI 2016 S. 8–10 [Nr. 1] (v. 27.1.2016). Berlin, BMAS Bundesministerium für Arbeit und Soziales.

BfN Bundesamt für Naturschutz [Walter, A., Wiehe, J., Schlömer, G., Hashemifarad, A., Wenzel, T., Albert, I., Hofmann, L., zum Hingst, J., von Haaren, C. 2018. Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien 2050. BfN-Skripten 501. Bundesamt für Naturschutz. Bonn.

BIOACID – Biologische Auswirkungen von Ozeanversauerung (Biological Impacts of Ocean Acidification): Ozeane im Klimawandel; <https://www.oceanacidification.de/einfuehrung/>; abgerufen 23.06.2019

Biermann, F., Möller, I. 2019. Rich man's solution? Climate engineering discourses and the marginalization of the Global South. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 19(2): 151–167.

Bonaiuti, M. 2017. Are we entering the age of involuntary degrowth? Promethean technologies and declining returns of innovation. *Journal of Cleaner Production* 197(2): 1800–1809.

Bossel, H. 2000. Policy assessment and simulation of actor orientation for sustainable development. *Ecological Economics* 35(3): 337–355.

Bowles, N., Alexander, S., Hadjikakou, M. 2019. The livestock sector and planetary boundaries: A „limits to growth“ perspective with dietary implications. *Ecological Economics* 160: 128–136.

Bringezu, S., O'Brien, M., Schütz, H. 2012. Beyond biofuels: Assessing global land use for domestic consumption of biomass: A conceptual and empirical contribution to sustainable management of global resources. *Land Use Policy* 29(1): 224–232.

Bryngelsson, D. K., Lindgren, K. 2013. Why large-scale bioenergy production on marginal land is unfeasible: A conceptual partial equilibrium analysis. *Energy Policy* 55: 454–466.

BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. 2015. Terra Preta / Pyrolysekohle: BUND-Einschätzung ihrer Umweltrelevanz. Berlin, BUND. URL: <http://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/terra-pret-a-pyrolysekohle-bund-einschaetzung-ihrer-umweltrelevanz>.

BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. 2019. Herausforderungen einer nachhaltigen Stoffpolitik – Notwendigkeit einer Transformation im globalen Kontext, BUND Position 69. Berlin, BUND.

Ciarli, T., Savona, M. 2019. Modelling the Evolution of Economic Structure and Climate Change: A Review. *Ecological Economics* 158: 51–64.

Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., Loaiza, S., Correa, F., Isthitani, M., Loboguerrero, M. A., Martínez-Barón, D., Graterol, E., Jaramillo, S., Torres, F. C., Arango, M., Guzmán, M., Avila, I., Hube, S., Kurtz, B. D., Zorrilla, G., Terra, J., Irisarri, P., Tarlera, S., LaHue, G., Scivittaro, B. W., Noguera, A. Bayer, C. 2018. Sustainable and Low Greenhouse Gas Emitting Rice Production in Latin America and the Caribbean: A Review on the Transition from Ideality to Reality. *Sustainability* 10(3).

Conniff, R. 2019. Kohlendioxid: Das Klimagas vergraben. *Spektrum der Wissenschaft* 2019(6): Magazin.

Cornwall, W. 2017. The burning question. *Science* 355(6329): 18–21.

Dass, P., Houlton, B.Z., Wang, Y., Warlind, D. 2018. Grasslands may be more reliable carbon sinks than forests in California. *Environmental Research Letters* 13(7): 074027.

Deutscher Bundestag. 2009. Das LOHAFEX-Experiment im südlichen Polarmeer. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Undine Kurth (Quedlinburg), Bärbel Höhn, Cornelia Behm, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 16/11860.

Drösler, M., Adelman, W., Augustin, J., Bergmann, L., Beyer, M., Giebels, M., Förster, C., Freibauer, A., Höper, H., Petschow, U., Hahn-Schöfl, M., Kantelhardt, J., Liebersbach, H., Schägner, J.-P., Schaller, L., Sommer, M., Thuille, A., Werhahn, M. 2009. Klimaschutz durch Moorschutz. Kap. 11 in M. Mahammadzadeh, H. Biebler, H. Bard (Hg). Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen: Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele. Köln, Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH: 89–97.

EASAC European Academies' Science Advisory Council. 2019. Forest bioenergy, carbon capture and storage, and carbon dioxide removal: an update. EASAC. Halle (Saale), Germany / Brussels, Belgium, German National Academy of Sciences / Royal Academies for Science and the Arts of Belgium.

Ekins, P. 1997. The Kuznets Curve for the Environment and Economic Growth: examining the evidence, *Environment and Planning A* 29: 805–830.

Englisch, M. 2007. Ökologische Grenzen der Biomassenutzung in Wäldern. *BWF-Praxisinformationen* 13: 8–10.

European Commission. 2019. Reflection Paper: Towards a Sustainable Europe by 2030. COM(2019)22. Brussels, European Commission.

European Commission. 2018. A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. COM(2018) 773 final. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank. Brussels, European Commission.

EEA European Environment Agency. 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? EEA Report 7/2006. EEA. Copenhagen, EEA.

EEA European Environment Agency. 2011. Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS). EEA Technical Report No 14/2011. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

EEA European Environment Agency. 2020. Europe's Environment 2020. State of the Environment Report. Publications Office of the European Union, Luxembourg.

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. State of the World's Forests 2016. Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities. FAO, Rome.

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations [Bélanger, J., Pilling, D. (eds.)]. 2019. The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture. Rome, FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture, Rome.

Fatheuer, T. 2014. Eine neue Ökonomie der Natur. *Ökologisches Wirtschaften* 29(2): 19–21.

Feldmann, J., Levermann, A. 2015. Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(46): 14191–14196.

Fischer-Kowalski, M., Amann, C. 2001. Beyond IPAT and Kuznets Curves: Globalization as a vital factor in Analysing the Environmental Impact of Socio-Economic Metabolism. *Population and Environment* 23(1): 7–47.

Flessa, H., Don, A., Jacobs, A., Dechow, R., Tiemeyer, B., Poeplau, C. 2018. Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands. Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg). Bonn, BMEL. URL: https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf.

Flückinger, W., Braun, S. 2009. Nährstoffe im Wald lassen – oder recyceln! *Wald und Holz* 9/09: 30–33.

Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente, J. L. V., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M. Minx, J. C. 2018. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13(6): 063002.

Giampietro, M., Mayumi, K. 2012. *The biofuel delusion: The fallacy of large scale agro-biofuels production*, Routledge, Taylor & Francis Group, Abingdon, Oxford, UK.

Gingrich, S., Lauk, C., Niederscheider, M., Pichler, M., Schaffartzik, A., Schmid, M., Magerl, A., Le Noë, J., Bhan, M., Erb, K. 2019. Hidden emissions of forest transitions: a socio-ecological reading of forest change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 38: 14–21.

Global CCS Institute. 2018. Global Status of CCS 2018. Melbourne, Australia. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/previous-reports/>

- Gowdy, J., Rosser Jr, J.B., Roy, L. 2013. The evolution of hyperbolic discounting: Implications for truly social valuation of the future. *Journal of Economic Behavior & Organization* 90, Supplement: S94–S104.
- Günther, R. 2010. Vier Fragen, vier Antworten. *Politische Ökologie* 123: 41–42.
- Harenda, K.M., Lamentowicz, M., Samson, M., Chojnicki, B.H. 2018. The Role of Peatlands and Their Carbon Storage Function in the Context of Climate Change. Ch. 11 in T. Zielinski, I. Sagan, W. Surosz, *Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals: Economic Growth, Social Inclusion and Environmental Protection*. Cham, Switzerland, Springer International Publishing: 169–187.
- Hargreaves, T. 2011. Practicing behaviour change: Applying social practice theory to pro-environmental behaviour change. *Journal of Consumer Culture* 11(1): 79–99.
- Holm S-O, Englund G. 2009. Increased ecoefficiency and gross rebound effect: Evidence from USA and six European countries 1960–2002. *Ecological Economics* 68(3): 879–887.
- Hülsbergen, K.-J., Rahmann, G. (Hg.) 2015: *Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben*. Forschungsergebnisse 2013–2014, Thünen Report 29. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, doi: https://doi.org/10.3220/REP_29_2015.
- Idel, A., Beste, A. 2018: *Vom Mythos der klimasmarten Landwirtschaft – oder warum weniger vom Schlechten nicht gut ist*. Die Grünen/Europäische Freie Allianz, Europabüro Hessen, Wiesbaden.
- idw 2020 Informationsdienst Wissenschaft, Karlsruher Institut für Technologie KIT 23.01.2020. Wissenschaftsjahr 2020 – Bioökonomie. https://idw-online.de/de/simplesearch?words=Mikroalgen+sind+die+unsichtbaren+Hoffnungstr%C3%A4ger+einer+klimaneutralen+Energieversorgung&t_form_=InputForm&scope=press_release&scope=event.
- IPBES Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [Brondizio, E.S., Diaz, S., Settele, J. (eds.)] (2019). *The IPBES Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germany, Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019. *Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems*. IPCC Special Reports. WMO, Geneva, Switzerland; UNEP, Nairobi, Kenya.
- IPCC [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy Maycock, E., Tignor, M., Waterfield, T. (eds.)] 2018. *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*. IPCC Special Report 15. IPCC. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change [R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)] 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland; <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- Johnston, C. M. T., Radeloff, V. C. 2019. Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(29): 14526.
- Jokinen et al. 2018: A 1500-year multiproxy record of coastal hypoxia from the northern Baltic Sea indicates unprecedented deoxygenation over the 20th century. *Biogeosciences* 15: 3975–4001.
- Joughin, I., Smith, B. E., Medley, B. 2014. Marine Ice Sheet Collapse Potentially Under Way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. *Science* 344(6185): 735–738.
- Keller, M., Halkier, B., Wilska, T.-A. 2016. Policy and Governance for Sustainable Consumption at the Crossroads of Theories and Concepts. *Environmental Policy and Governance* 26(2): 75–88.
- Kritee, K., Nair, D., Zavala-Araiza, D., Proville, J., Rudek, J., Adhya, T.K., Loecke, T., Esteves, T., Balireddygar, S., Dava, O., Ram, K., S. R., A., Madasamy, M., Dokka, R. V., Anandaraj, D., Athiyaman, D., Reddy, M., Ahuja, R., Hamburg, S.P. 2018. High nitrous oxide fluxes from rice indicate the need to manage water for both long- and short-term climate impacts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(39): 9720–9725.
- Krupp, R. E. 2010. Vom Kamin in die Erde. Die CCS-Technologie. *Politische Ökologie* Nr. 123: 16–19.
- Kuchler, M. 2014. Sweet dreams (are made of cellulose): Sociotechnical imaginaries of second-generation bioenergy in the global debate. *Ecological Economics* 107: 431–437.
- Kurz, R., Spangenberg, J.H., Zahrnt, A. 2019. Das fehlende Szenario „Klimaschutz ohne Wachstum“. *Ökologisch Wirtschaften* 34(2): 35–39.

- Lamperti, F., Dosi, G., Napoletano, M., Roventini, A., Sapio, A. 2018. Faraway, So Close: Coupled Climate and Economic Dynamics in an Agent-based Integrated Assessment Model. *Ecological Economics* 150: 315–339.
- Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N., Schwanitz, J. 2017. Future growth patterns of world regions – A GDP scenario approach. *Global Environmental Change* 42: 215–225.
- Leifeld, J., Menichetti, L. 2018: The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9: 1071.
- Lenton, T.M. 2010. The potential for land-based biological CO₂ removal to lower future atmospheric CO₂ concentration *Carbon Management* 1(1): 145–160.
- Leujak, W., Ginzky, H. & Claussen, U. 2011: Eisendüngung – Mehr CO₂ Fixierung durch das Meer? Warnsignale Klima – Die Meere: 348–353
- Lorek S., Spangenberg, J.H. 2019. Energy sufficiency through social innovation in housing. *Energy Policy* 126: 287–294.
- Lovejoy, T.E., Nobre, C. 2018. Amazon Tipping Point. *Science Advances* 4(2): eaat2340.
- Lu, X., Cao, L., Wang, H., Peng, W., Xing, J., Wang, S., Cai, S., Shen, B., Yang, Q., Nielsen, C.P., McElroy, M.B. 2019. Gasification of coal and biomass as a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(17): 8206–8213.
- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., Grace, J. 2008. Oldgrowth forests as global carbon sinks. *Nature* 455(7210): 213–215.
- Malkamäki, A., D'Amato, D., Hogarth, N.J., Kanninen, M., Pirard, R., Toppinen, A., Zhou, W. 2018. A systematic review of the socio-economic impacts of large-scale tree plantations, worldwide. *Global Environmental Change* 53: 90–103.
- Manski C. F. 2019. Communicating uncertainty in policy analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(16): 7634–7641.
- Maurer, J. M., Schaefer, J. M., Rupper, S., Corley, A. 2019. Acceleration of ice loss across the Himalayas over the past 40 years. *Science Advances* 5(6): eaav7266.
- McGlashan, N.R., Workman, M.H.W., Shah C.N. 2012. Negative Emissions Technologies. Grantham Institute for Climate Change Briefing paper No 8. London, Imperial College
- Minx, J.C., Lamb, W.F., Callaghan, M.W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G.F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J.L., Wilcox, J., del Mar Zamora Dominguez, M. 2018. Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters* 13(6): 063001.
- Mundaca, L., Ürge-Vorsatz, D., Wilson, C. 2019. Demand-side approaches for limiting global warming to 1.5 °C. *Energy Efficiency* 12(2): 343–362.
- Nemet, G. F., Callaghan, M. W., Creutzig, F., Fuss, S., Hartmann, J., Hilaire, J., Lamb, W. F., Minx, J. C., Rogers, S., Smith, P. 2018. Negative emissions—Part 3: Innovation and upscaling. *Environmental Research Letters* 13(6): 063003.
- Neumann, W. 2010. Krückentechnologie statt Brückentechnologie. *Politische Ökologie* 123: 56–59.
- Niall et al. 2012. Negative Emissions Technologies, Briefing paper no. 8, Oktober 2012., Grantham Institute for Climate Change, Imperial College, London.
- Nordhaus, W. 2019. Economics of the disintegration of the Greenland ice sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(25): 12261.
- Parish, F., Sirin, A.A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T.YU., Silvius, M. 2008. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Kuala Lumpur, Malaysia, Wageningen, Netherlands, Global Environment Centre and Wetlands International.
- Rahmstorf, S. 2019. Können Bäume das Klimaretten, SciLogs –KlimaLounge 16.7.2019. <https://scilog.spektrum.de/kimalounge/>
- Riahi K, van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill BC, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J. C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner M, Tabeau A, Tavoni M. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42: 153–168.
- Richmond, M E 2018. Glyphosate: A review of its global use, environmental impact, and potential health effects on humans and other species. *Journal of Environmental Studies and Sciences* <https://doi.org/10.1007/s13412-018-0517-2>

- Rignot, E., Mouginot, J., Morlighem, M., Seroussi, H., Scheuchl, B. 2014. Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters* 41(10): 3502–3509.
- Rijnhout, L., Mastini, R. (eds.) 2018. *Sufficiency: Moving beyond the gospel of eco-efficiency*. Brussels, Friends of the Earth Europe.
- Rintoul, S. R., Silvano, A., Pena-Molino, B., van Wijk, E., Rosenberg, M., Greenbaum, J.S., Blankenship, D. D. 2016. Ocean heat drives rapid basal melt of the Totten Ice Shelf. *Science Advances* 2(12): e1601610.
- Prigogine I. 1997. *The end of certainty: Time, Chaos and the new Laws of Nature*. New York, The Free Press.
- Salter, I., Schiebel, R., Ziveri, P., Movellan, A., Lampitt, R., Wolff, G.A. 2014. Carbonate counter pump stimulated by natural iron fertilization in the Polar Frontal Zone. *Nature Geoscience* 7: 885.
- Sanchez, D. L., Johnson, N., McCoy, S. T., Turner, P. A., Mach, K. J. 2018. Near-term deployment of carbon capture and sequestration from biorefineries in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(19): 4875–4880.
- Sanders, J., Heß, J. 2019. *Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft*. Thünen Report 65. Braunschweig, Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- Santarius T, Soland M. 2018. How Technological Efficiency Improvements Change Consumer Preferences: Towards a Psychological Theory of Rebound Effects. *Ecological Economics* 146: 414–424.
- Sarmiento, J.L., Orr, J.C. 1991. Three-dimensional simulations of the impact of Southern Ocean nutrient depletion on atmospheric CO₂ and ocean chemistry. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1928–1950.
- Schütte G, Eckerstorfer M, Rastelli V, Reichenbecher W, Restrepo-Vassalli S, Ruohonen-Lehto M, Wuest Saucy AG, Mertens M 2017. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environ Sci Eur* 29:5. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y>
- Sers, M. R., Victor, P. A. 2018. The Energy-emissions Trap. *Ecological Economics* 151: 10–21.
- Shepherd, A., Gilbert, L., Muir, A. S., Konrad, H., McMillan, M., Slater, T., Briggs, K. H., Sundal, A. V., Hogg, A. E., Engdahl, M. E. 2019. Trends in Antarctic Ice Sheet Elevation and Mass. *Geophysical Research Letters*
- Shove, E., Walker, G. 2010. Governing transitions in the sustainability of everyday life. *Research Policy* 39(4): 471–476.
- Showstack, R. 2014. Sector of West Antarctic Ice Sheet in „Irreversible Retreat“ *Eos, Transactions American Geophysical Union* 95(20): 168–168.
- Smith, P., Davis, S.J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., Kato, E., Jackson, R.B., Cowie, A., Kriegler, E., van Vuuren, D.P., Rogelj, J., Ciais, P., Milne, J., Canadell, J.G., McCollum, D., Peters, G., Andrew, R., Krey, V., Shrestha, G., Friedlingstein, P., Gasser, T., Grubler, A., Heidug, W.K., Jonas, M., Jones, C. D., Kraxner, F., Littleton, E., Lowe, J., Moreira, J.R., Nakicenovic, N., Obersteiner, M., Patwardhan, A., Rogner, M., Rubin, E., Sharifi, A., Torvanger, A., Yamagata, Y., Edmonds, J., Yongsung, C. 2016. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change* 6(1): 42–50.
- Soentgen J, Hilbert K, von Groote-Bidlingmaier C, Herzog-Schröder G, Pabst E, Timpf S. 2017. Terra preta de índio: Commodification and Mythification of the Amazonian Dark Earths. *GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society* 26(2): 136–143.
- Song, J., Wan, S., Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Han, X., Zeng, D.-H., Cao, G., Wang, Q., Bai, W., Liu, L. 2018. The carbon sequestration potential of China's grasslands. *Ecosphere* 9(10): e02452.
- Spangenberg JH. 2001. The Environmental Kuznets Curve – a Methodological Artefact. *Population and Environment* 23(2): 175–192.
- Spangenberg JH, Lorek S. 2019. Sufficiency and consumer behaviour: from theory to policy. *Energy Policy* 129: 1070–1079.
- Spangenberg JH, Lorek S. 2002. Environmentally sustainable household consumption: From aggregate environmental pressures to priority fields of action. *Ecological Economics* 43(2-3): 127–140.
- Spangenberg JH, Polotzek L. 2019. Like blending chalk and cheese – the impact of standard economics in IPCC scenarios. *Real-World Economics Review* 87: 196–211.
- Spangenberg J. H., Settele, J. 2009a. Biofuels: Steer Clear of Degraded Land. *Science* 326 (4 December 2009): 1346
- Spangenberg, J. H., Settele, J. 2009b. Neither Climate Protection nor Energy Security: Biofuels for Biofuels? *Journal of International Relations* 20(5): 89–108.

- Spangenberg, J. H., von Haaren, C., Settele, J. 2014. The ecosystem service cascade: Further developing the metaphor. Integrating societal processes to accommodate social processes and planning, and the case of bio-energy. *Ecological Economics* 104: 22–32.
- Speck, M., Hasselkuss, M. 2015. Sufficiency in social practice: searching potentials for sufficient behavior in a consumerist culture. *Sustainability: Science, Practice, & Policy* 11(2): 14–32.
- Su, B., et al. 2018. Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(42): 10600–10605.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., Schellnhuber, H. J. 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (33): 8252–8259.
- UBA Umweltbundesamt. 2013. Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Position. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA Umweltbundesamt. 2016. Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden, UBA Texte 04/16. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA Umweltbundesamt. 2018. Entwicklung eines quantitativen Modells „Nachhaltiges Deutschland“, Band 1–4. UBA Texte 95/2018–98/2018. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA Umweltbundesamt. 2019. Biogasanlagen – Sicherheitstechnische Aspekte und Umweltauswirkungen. Hintergrund. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA Umweltbundesamt [Günther, J., Lehmann, H., Lorenz, U., Purr, K.]. 2019. Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- Ulgjati, S. 2001. A Comprehensive Energy and Economic Assessment of Biofuels: When „Green“ Is Not Enough. *Critical Reviews in Plant Sciences* 20(1): 71–106.
- Wachsmuth, J., Duscha, V. 2019. Achievability of the Paris targets in the EU—the role of demand-side-driven mitigation in different types of scenarios. *Energy Efficiency*, 12(2), pp. 403–421.
- Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A., Shrestha, A.B. (eds.). 2019. *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham, Switzerland, Springer Nature Switzerland.
- Wiens, J. J. 2016. Climate-Related Local Extinctions Are Already Widespread among Plant and Animal Species. *PLoS Biology* 14(12): e2001104.
- t Mannelje, L., Amézquita, M.C., Buurman, P., Ibrahim, M.A. 2008. *Carbon sequestration in tropical grassland ecosystems*. Wageningen : Wageningen Academic Publishers.
- Trotta, G., Lorek, S., Spangenberg, J.H. 2018. Energy efficiency in the residential sector: identification of promising policy instruments and private initiatives among selected European countries. *Energy Efficiency* 11(8): 2111–2135.
- Weiss, A. 2016. *Energy balance of microalgae biofuels*, Dissertation an der TU Darmstadt, Projekt am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT. URL: https://www.itas.kit.edu/projekte_weiss10_emik.php; http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5352/1/Weiss_Annika_Diss.pdf.
- Viessmann. 2019. Grünes Licht für erste industrielle Power-to-Gas-Anlage im schweizerischen Dietikon. <https://www.viessmann-newsroom.de/unternehmen/grunes-licht-fur-erste-industrielle-power-to-gas-anlage-im-schweizerischen-dietikon>. Zugriff 11.12.2019.
- Wiedmann, T., Lenzen, M. 2018. Environmental and social footprints of international trade. *Nature Geoscience* 11(5): 314–321.
- Wilson, C., Pettifor, H., Cassar, E., Kerr, L., Wilson, M. 2019. The potential contribution of disruptive low-carbon innovations to 1.5 °C climate mitigation. *Energy Efficiency* 12(2): 423–440.
- Ziebarth, N. 2010: Die Technik allein wird's nicht richten – Die ökologischen Dimensionen des Geo-Engineering. *politische ökologie* 120: 30–32.

Impressum

Herausgeber:

*Bund für Umwelt
und Naturschutz
Deutschland e.V. (BUND)
Friends of the
Earth Germany
Kaiserin-Augusta-Allee 5
10553 Berlin*

Telefon: 0 30/2 75 86-40
Telefax: 0 30/2 75 86-440
mail: info@bund.net
www.bund.net

Autor*innen:

*Joachim H. Spangenberg,
Werner Neumann,
Heinz Klöser,
Stefan Wittig,
Tilmann Uhlenhaut,
Martha Mertens,
Edo Günther,
Ingo Valentin,
Markus Große Ophoff*

V.i.S.d.P.: *Antje von Broock*

1. Auflage, April 2020