

# Geoengineering oder ökologischer Klimaschutz

**Klima-Engineering als Technik gewordene  
menschliche Hybris**

# Inhalt

<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>Summary</b>	<b>6</b>
<b>1. Einleitung: Der Status quo</b>	<b>9</b>
<b>2. Geoengineering I: Negative Emissionen &amp; Carbon Capture and Storage</b>	<b>12</b>
2.1 Marine CO <sub>2</sub> -Senken	16
2.1.1 Ozeandüngung	16
2.1.2 Gesteinsverwitterung und Meeresalkalinisierung	18
2.2 CCS Carbon Capture and Sequestration	19
2.2.1 CCS – damals an fossilen Kraftwerken, heute an Stahl- und Zementwerken	20
2.2.2 Direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS)	23
2.2.3 BECCS Bioenergie mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung	23
2.3 Pyrolysekohle/Terra Preta/Biochar	25
2.4 Gesteinsverwitterung an Land	26
2.5 Exkurs: nicht-fossile Treibstoffe (Biofuels, synthetische Kraftstoffe)	26
2.6 Fazit	29
<b>3. Geoengineering II: Radiation Management</b>	<b>31</b>
3.1 Weltraumbasierte Ansätze	31
3.2 Erhöhung der Wolkenalbedo	32
3.2.1 Marine Wolkenaufhellung (Marine cloud brightening, MCB)	32
3.2.2 Ausdünnung von Zirruswolken (Cirrus Cloud Thinning, CCT)	33
3.3 Stratosphärische Aerosolinjektion (Stratospheric Aerosol Injection, SAI)	34
3.4 Erhöhung der Oberflächenalbedo	36
3.4.1 Bedeckung von Eisoberflächen und die Abdeckung von Gletschern sowie Wüsten	36
3.4.2 Albedo-Effekte im Nutzpflanzenanbau	37
3.4.3 Rodung borealer Wälder	37
3.4.4 Aufhellen/Bemalen von Oberflächen	38
3.5 Zusammengefasste kritische Reflexion von SRM-Maßnahmen	38
3.6 Fazit	40
<b>4. BUND: Ökologischer Klimaschutz – Sequestrierung ohne Geoengineering</b>	<b>41</b>
4.1 Ökologisierung der Landwirtschaft	42
4.2 Wiedervernässung von Mooren	43
4.3 Aufforstung und Wiederbewaldung	44
4.3.1 Wiederbewaldung	45
4.3.2 Aufforstung	46
4.3.3 Holznutzung	47
4.4 Steppen	47
4.5 Urbane Räume	48
4.6 Aquatische Systeme	48
4.7 Fazit	48
<b>5. Kontext: Macht und Modelle</b>	<b>49</b>
5.1 Politisch-wirtschaftlicher Kontext	49
5.1.1 Wirtschaftliche Interessen, Machtfragen und „moral hazard“	49
5.1.2 Politik durch Normung	49
5.1.3 Global denken, global handeln	50
5.2 Klimamodelle	51
<b>6. Forderungen des BUND</b>	<b>54</b>
6.1 Kernforderungen	54
6.2 Details und Erläuterungen	56
<b>7. Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>Die politische Position des BUND/Friends of the Earth Germany in den BUND Positionen</b>	<b>72</b>
<b>The political position of BUND/Friends of the Earth Germany in the BUND Positions</b>	<b>74</b>

# Zusammenfassung

Geoengineering ist ein zusammenfassender Begriff für eine Vielzahl von bewussten und zielgerichteten – meist in großem Maßstab durchgeführten – Eingriffen in das Klimasystem mit dem Ziel, die vom Menschen gemachte (anthropogene) Klimaerwärmung zu mildern (UBA 2019). Der Begriff bezeichnet sowohl Technologien, die die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration verringern sollen, als auch solche, die durch eine Verringerung der Wärmewirkung der Sonnenstrahlung Kühlungseffekte erzielen wollen.

## Verringerung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen

Der aktuelle sechste Sachstandsbericht des IPCC 2021/2022 zeigt deutlich, wie schwierig es wird, 1,5 °C-Ziel noch zu halten. Er beschreibt drei Arten von Entwicklungspfaden:

1. Szenarien, die eine längerfristige Erderhitzung von 2 °C und mehr beinhalten. Diese entsprechen zwar den gegenwärtigen Trends und politischen Selbstverpflichtungen, sind aber pauschal zu gefährlich, werden vom BUND als verantwortungslos verurteilt und hier nicht weiter diskutiert.
2. Szenarien, die das verfügbare Treibhausgasbudget einhalten, bei dem die Klimaerwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % auf maximal 1,5 °C beschränkt werden kann. Diese Szenarien hält der BUND für eine geeignete Grundlage der Entwicklung einer erfolgreichen Klimapolitik, insbesondere wenn sie durch Überlegungen zu Postwachstum, nachhaltigem Konsum und Suffizienz weiterentwickelt werden.
3. Szenarien, die zwar den Zielwert von maximal 1,5 °C Erderhitzung überschreiten („Overshoot“), aber versprechen, durch „negative Emissionen“ die Erwärmung in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts auf 1,5 °C zurückzuführen. Der BUND hält diese Szenarien für gefährlich, denn sie basieren meist auf dem Vertrauen in technische Lösungen, deren Mach-

barkeit ebenso wenig geklärt ist wie ihre Auswirkungen und Wünschbarkeit. Insbesondere sind erhebliche Biodiversitätsverluste und gesellschaftliche Krisenentwicklungen zu erwarten.

Aus Sicht des BUND sind Szenarien mit Overshoot keinesfalls gleichrangig zu Szenarien, die das Treibhausbudget einhalten, sondern akzeptieren unverantwortbare Risiken für Ökosysteme und die biologische Vielfalt durch die Abfolge von Temperaturanstieg und anschließender Rückführung. Beide Prozesse, Erwärmung und Abkühlung, führen zur Verlagerung von Lebensräumen und zur Störung von Nahrungsnetzen, mit entsprechenden Risiken für die biologische Vielfalt und Ökosystemleistungen (IPBES 2019). Die ökologischen Folgen des Overshoots können also fatal sein (Su et al. 2018; Wiens 2016). Eine auch zeitweise Erderwärmung von mehr als 1,5 °C erhöht zudem die Wahrscheinlichkeit, dass Kippunkte überschritten und irreversible Degradationsprozesse in Gang gesetzt werden (Steffen et al. 2018; IPCC 2018; 2021). Besonders beunruhigend ist dabei, dass nicht nur die unmittelbar mit einem Kippunkt zusammenhängenden Folgen ausgelöst werden können, sondern die Gefahr von Domino-Effekten besteht.

**Aus all diesen Gründen können Szenarien, die einen Overshoot zulassen und die Erderhitzung durch „negative Emissionen“ bis zum Jahre 2100 wieder auf 1,5 °C zurückführen wollen, aus Sicht des BUND nicht als geeignete Grundlage für eine erfolgreiche Klimapolitik betrachtet werden.**

Die Technologien zur Erreichung von „negativen Emissionen“ sind mit weiteren Risiken behaftet. Die Düngung von Ozeanen um Algenwachstum zu fördern ebenso wie deren Alkalisierung bedrohen das Ökosystem Meer. Bei der Herstellung von Pyrolysekohle können organische Schadstoffe entstehen, aus Gründen der Vorsorge sollten diese nicht in den Bodeneingebracht werden. Die Abscheidung und Verpressung von CO<sub>2</sub>-Emissionen (CCS) ist langfristig

nicht sicher, steigert den Energieverbrauch, unterminiert den Ausstieg aus der Kohlenstoffwirtschaft und trifft auf wenig Akzeptanz in der Bevölkerung (BUND 2023). Die Revitalisierung degradierter Böden sowie die Aufforstung von Altstandorten sind nur dann sinnvoll, wenn sie sowohl zu Klimaschutz als auch zu Biodiversität beitragen. Das Potential für diese hochwertigen Projekte ist jedoch begrenzt.

### **Manipulation der Sonneneinstrahlung**

Unter Solar Radiation Management (SRM) oder Solar Geoengineering können Strategien zusammengefasst werden, die darauf abzielen, den Strahlungsenergiehaushalt der Erde direkt zu verändern, mit dem Ziel, die Erwärmung zu reduzieren und einen Kühleffekt zu generieren (IPCC 2014; Lawrence et al. 2018; Bellamy et al. 2013). Allen SRM vorgeschlagenen Maßnahmen ist gemeinsam, dass sie den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre nicht bremsen und damit verbundene Wirkungen wie die Versauerung der Meere, die der wichtigsten Eiweißquellen der Menschheit bedroht, weiter anwachsen lassen.

In weltraumbasierten Ansätzen wird vorgeschlagen, gigantische Spiegel zwischen Erde und Sonne zu platzieren, oder regelmäßig Staubwolken aus Mondgestein, gewonnen aus großen Mondbergwerken, in den Verlauf der Sonnenstrahlung zu schießen. Stratospheric Aerosol Injection Projekte setzen auf atmosphärische Strahlungsreflektion durch die Injektion von Aerosolen wie Aluminium oder Schwefelpartikel in die Stratosphäre (die wieder abregnen und sich im Boden akkumulieren würden). Verwandt damit sind Vorschläge, durch verschiedene Methoden (z.B. durch Einsprühen von Meerwasser) die Wolken aufzuhellen und damit die Sonnenreflektion zu vergrößern. Technische Machbarkeit, Kosten und Ressourcenverbrauch aller derartigen Projekte sind ebenso unbekannt wie ihre Auswirkungen auf der Erde. So könnten sich im Falle eines technischen Erfolges z.B. die Windsysteme verlagern, und mit ihnen die für die Welternährung essenziellen Niederschlagszonen, -mengen und -qua-

litäten (Monsun). Die ebenfalls vorgeschlagene Erhöhung der Oberflächenalbedo ist nur da sinnvoll, wo es darum geht die Wärmeaufnahme von Gebäuden zu reduzieren; die Globaltemperatur ließe sich mit solchen Maßnahmen nicht in messbarer Höhe verändern.

**Der Versuch durch eine Manipulation der Sonneneinstrahlung die Überhitzung zwischenzeitlich (bis zur erhofften Abkühlung durch „negative Emissionen“) oder permanent (als Ersatzmaßnahme) zu begrenzen, ist mit großen und zum Teil noch unverstandenen Risiken behaftet. Deshalb ist SRM weder als Dauer – noch als Zwischenlösung eine ökologisch wie politisch verantwortbare Position.**

Geoengineering ist nicht nur mit großen Risiken behaftet, es wird auch als Rechtfertigung für eine Verringerung der Ambitionen bei der Treibhausgasreduktion benutzt (Pomrehn 2010; Sikka 2020). Geoengineering bleibt insgesamt eine riskante Nicht-Lösung mit technischen, finanziellen, ökologischen und politischen Risiken, wenn diese Technologien weiter vorangetrieben werden. Die begrenzten Potenziale zur ökologisch sinnvollen Kohlenstoffbindung, die der BUND identifiziert hat, sind für den Ausgleich wirklich unvermeidbarer Restemissionen nach 2050 notwendig und dürfen nicht heute in Ausgleichsrechnungen zur Erreichung von Netto Null verwandt werden.

**Die fünf Kernforderungen des BUND sind:**

- 1. Die Begrenzung der Erderhitzung auf 1,5 Grad ist unbedingt nötig**  
**Der BUND fordert von der Bundesregierung einen konsequenten Klimaschutz, der zur Einhaltung des Treibhausbudgets ohne Overshoot führt, wie vom Verfassungsgericht verlangt.**
- 2. Echte Treibhausgasminderung statt Geoengineering**  
**Geoengineering und „negative Emissionen“ ersetzen keine Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen – beim derzeitigen**

Niveau der Emissionen sind sie von vernachlässigbarer Wirkung. Maßnahmen zur Meeresalkalinisierung und zur Düngung der Ozeane lehnt der BUND ebenso ab wie CCS, die Einbringung von Pyrolysekohle in die Böden, und den großflächigen Anbau von Pflanzen zur Biomasseproduktion zur Energiegewinnung. Alle beschriebenen Techniken zur Erzeugung von „negativen Emissionen“ sind zudem für die großflächige Anwendung ungetestet, nicht sicher skalierbar, hoch energieintensiv, und mit ökologischen Folgeschäden verbunden, potenziell verheerend für Biodiversität, Ökosysteme und ihre Leistungen.

### 3. Radiation Management verbieten und weltweit ächten

Die Risiken des Radiation Management sind hoch, der Nutzen begrenzt und die Machbarkeit unsicher. Wir fordern von der Bundesregierung ein Ende jeglicher Forschungsförderung und Initiativen für ein umfassendes völkerrechtliches Verbot.

### 4. Natürlichen Klimaschutz fördern – aber richtig

Biogene Kohlenstofffixierung kann eine Win-Win-Lösung für Klimaschutz und biologische Vielfalt sein. Schöpft man die nachhaltigen Potenziale aus und reduziert man den Energieverbrauch um die Hälfte, reicht der natürliche Klimaschutz aus, um die unvermeidlichen Restemissionen zu absorbieren. Der BUND fordert eine verstärkte Förderung von ökologischem Land- und Waldbau, Wiederbewaldung mit standortgemäßen Baumarten, Moorschutz und Wiedervernässung trockengelegter Moore wo immer möglich, sowie die Revitalisierung degradierter Böden.

### 5. Politische Verantwortung heißt weiter denken als die Modelle tragen

Die vom IPCC ausgewerteten ökonomischen Modelle reichen als Basis für Politikentscheidun-

gen nicht aus. Wichtig ist es Aspekte wie Konsumwandel, Suffizienz(politik), Regulierung jenseits ökonomischer Instrumente und gesellschaftliche Transformationsprozesse jenseits ökonomischer Wirkmechanismen, nachhaltig verfügbare Ressourcen, insbesondere Biomasse, die Folgen einer Postwachstumsentwicklung und die Finanzierung von Gemeingütern (Klimaanpassung, Reparatur von Klimafolgeschäden und Ökosystemdegradierungen, aber auch Gesundheitsschutz und soziale wie externe Sicherheit) auch unter Postwachstumsbedingungen mit in die Szenario-Narrative aufzunehmen, auch wenn diese in den gängigen Modellen nicht abgebildet werden können. Entscheidungsgrundlage müssen dann die Narrative sein („harte Fakten“), und nicht die Berechnungen der Modelle („weiche Zahlen“).

# Summary

Geoengineering is an umbrella term for a variety of deliberate and targeted – usually large-scale – interventions in geochemical or biogeochemical cycles of the Earth by technical means, with the aim of mitigating human-made (anthropogenic) global warming (UBA 2019). Geoengineering is not intended to combat the cause of climate change, i.e. to reduce the emissions of anthropogenic greenhouse gases, but to moderate the consequences, either by reducing atmospheric carbon dioxide concentrations or by manipulating the earth's radiation budget to achieve cooling effects by reducing the thermal effect of solar radiation. The removal of CO<sub>2</sub> from the atmosphere, also known as "negative emissions", play an important role in limiting the climate crisis in the IPCC scenarios.

## Reducing atmospheric greenhouse gas concentrations

The current Sixth Assessment Report of the IPCC 2021/2022 clearly shows how difficult it will be to maintain the 1.5 ° target. It describes three types of development pathways:

1. scenarios involving longer-term global warming of 2 °C or more. Although these correspond to current trends and political commitments, they are too dangerous across the board, are condemned by BUND as irresponsible and are not discussed further here.
2. scenarios that adhere to the available greenhouse gas budget, in which climate warming can be limited to a maximum of 1.5 °C with a probability of 50%. BUND considers these scenarios to be a suitable basis for the development of a successful climate policy, especially if they are further developed through considerations of post-growth, sustainable consumption and sufficiency.
3. scenarios that exceed the target value of a maximum of 1.5 °C global warming ("overshoot"), but promise to reduce warming to 1.5 ° in the second half of the century through "negative emissions". BUND considers these scenarios dangerous because they are mostly based on trust in technical solutions whose feasibility is just as unclear as their effects and desirability. In particular, considerable losses of biodiversity and social crises are to be expected.

From BUND's point of view, scenarios with overshoot are by no means on a par with scenarios that adhere to the greenhouse budget, but accept irresponsible risks for ecosystems and biodiversity through the sequence of temperature increase and subsequent recession. Both processes, warming and cooling, lead to habitat displacement and food web disruption, with corresponding risks to biodiversity and ecosystem services (IPBES 2019). The ecological conse-

### What is geoengineering, what isn't?

According to this definition, small-scale interventions are only part of geoengineering if they are applied ubiquitously and thus add up to a large-scale intervention. This intervention must also be primarily aimed at mitigating global warming; nature conservation measures that also lead to greater carbon sequestration as a welcome side effect are not part of geoengineering according to this definition. On the other hand, geoengineering strategies could include an orientation of agriculture or forestry towards carbon sequestration, disregarding factors such as soil biodiversity, soil fertility, yield and social compatibility.

quences of overshoot can thus be fatal (Su et al. 2018; Wiens 2016). Global warming of more than 1.5 °C, even temporarily, also increases the likelihood that tipping points will be exceeded and irreversible degradation processes will be set in motion (Steffen et al. 2018; IPCC 2018; 2021). What is particularly worrying is that not only can the consequences directly associated with a tipping point be triggered, but there is a risk of domino effects.

**For all these reasons, scenarios that allow an overshoot and aim to bring global warming back to 1.5 °C by 2100 through "negative emissions" cannot, in BUND's view, be regarded as a suitable basis for a successful climate policy.**

The technologies for achieving "negative emissions" are fraught with further risks. The fertilisation of oceans to promote algae growth as well as their alkalisation threaten the marine ecosystem. The production of pyrolysis charcoal can produce organic pollutants, which should not be introduced into the soil for precautionary reasons. The production of bio-based fuels is associated with high land consumption and pesticide use and thus endangers biodiversity; ExxonMobil was the last Big Oil company to abandon its massively advertised project to produce bio-fuels from algae (Werstervelt 2023). The capture and injection of CO<sub>2</sub> emissions (CCS) is not safe in the long term, increases energy consumption, undermines the exit from the carbon economy and meets with little acceptance among the population (BUND 2023). The revitalisation of degraded soils and the reforestation of abandoned sites only make sense if they contribute to both climate protection and biodiversity. However, the potential for these high-value projects is limited.

### **Manipulation of solar radiation**

Solar Radiation Management (SRM) or solar geoengineering can be used to summarise strategies that aim to directly alter the Earth's radiation energy budget

with the aim of reducing warming and generating a cooling effect (IPCC 2014; Lawrence et al. 2018; Bellamy et al. 2013). What all SRM proposed measures have in common is that they do not slow down the increase of CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere and allow associated effects such as ocean acidification, which threatens humanity's most important source of protein, to continue to grow. Space-based approaches propose placing gigantic mirrors between the Earth and the Sun, or periodically shooting dust clouds of lunar rock into the path of solar radiation. Stratospheric aerosol injection projects rely on atmospheric radiation reflection by injecting aerosols such as aluminium or sulphur particles into the stratosphere (which would rain back down and accumulate in the ground). Related to this are proposals to lighten the clouds by various methods (e.g. by spraying seawater) and thus increase solar reflection. The technical feasibility, costs and resource consumption of all such projects are as unknown as their impact on Earth. In the event of technical success, for example, wind systems could shift, and with them the precipitation zones, quantities and qualities (monsoons) essential for feeding the world. The likewise proposed increase in surface albedo only makes sense where it is a matter of reducing the heat absorption of buildings; the global temperature could not be changed to any measurable extent with such measures.

The attempt to limit overheating temporarily (until the hoped-for cooling through "negative emissions") or permanently (as a substitute measure) by manipulating solar radiation is fraught with great risks, some of which are not yet understood, and is therefore neither an ecologically nor a politically responsible position as a permanent or interim solution.

Geoengineering is not only fraught with great risks, it is also used as a justification for lowering greenhouse gas reduction ambitions (Pomrehn 2010; Sikka 2020). Geoengineering remains overall a risky non-solution with technical, financial, environmental and

political risks if these technologies are pushed further. The limited potentials for ecologically meaningful carbon sequestration identified by BUND are necessary for offsetting truly unavoidable residual emissions after 2050 and must not be used today in offset calculations to achieve net zero.

**BUND's five core demands are:**

**1. Limiting global warming to 1.5 degrees is absolutely necessary**

**BUND demands consistent climate protection from the German government, leading to compliance with the greenhouse budget without overshoot, as required by the Constitutional Court.**

**2. Genuine greenhouse gas reduction instead of geoengineering**

**Geoengineering and "negative emissions" are no substitute for efforts to reduce greenhouse gas emissions – at current levels of emissions they are of negligible effect. BUND rejects measures for marine alkalisation and fertilisation of the oceans as well as CCS, the injection of pyrolysis coal into the soil, and the large-scale cultivation of plants for biomass production for energy generation. All of the described techniques for generating "negative emissions" are also untested for large-scale application, not safely scalable, highly energy-intensive, and associated with consequential ecological damage, potentially devastating to biodiversity, ecosystems and their services.**

**3. Ban and globally outlaw radiation management**

**The risks of radiation management are high, the benefits limited and the feasibility uncertain. We call on the German government to end all research funding and to take initiatives for a comprehensive ban under international law.**

**4. Promoting natural climate protection – but doing it right**  
**Biogenic carbon fixation can be a win-win solution for climate protection and biodi-**

**versity. If the sustainable potentials are exploited and primary energy consumption is reduced by half, well-managed natural carbon sinks are sufficient to absorb the unavoidable residual emissions. BUND calls for increased promotion of ecological agriculture and silviculture, reforestation with tree species suited to their location, peatland protection and rewetting of drained peatlands wherever possible, as well as the revitalisation of degraded soils.**

**5. Political responsibility requires thinking beyond what models say**

**The economic models evaluated by the IPCC are no sufficient basis for policy decisions. It is important to include social transformation processes beyond economic mechanisms, such as consumption change, sufficiency and sufficiency policy, together with environmental aspects such as sustainably available resources, especially biomass. Just as important is to represent regulation beyond economic instruments, the consequences of post-growth development and the financing of common goods (climate adaptation, repair of climate damage and ecosystem degradation, but also health protection and social and external security) in the scenario narratives. Such factors must be taken into account, together with the emerging conditions of a resource-constrained, post-growth society, even if they cannot be represented in the current models. The basis for decision-making must then be the narratives ("hard facts") and not the calculations of the models ("soft numbers").**

# 1. Einleitung: Der Status quo

Die Klimakrise hat uns erreicht. Rekordverdächtige Hitze hat in der jüngsten Vergangenheit Jahr für Jahr Nordamerika, Europa, China, Australien, Indien und Pakistan heimgesucht und vielerorts Waldbrände ausgelöst. Meteorologen der EU-Kommission haben festgestellt, dass die 2022er Dürre die schlimmste Dürre auf dem europäischen Kontinent seit mehr als 500 Jahren war (Toreti et al. 2022). Die niedrigen Wasserstände beeinträchtigten nicht nur die Schifffahrt oder machten sie unmöglich (mit der Folge, dass mehr Transport per LKW erfolgte, mit hohen Emissionen). Regelmäßige Sommerhitzen führen auch zur Erwärmung der Flüsse, was viele aquatische Organismen an den Rand des Aussterbens bringt. Mangelndes Kühlwasser legt Industrieproduktionen und Kraftwerke lahm; so standen in Sommer und Herbst 2022 mehr als die Hälfte der französischen AKW wegen Kühlwassermangels und Wartungsarbeiten still.

Bei den Waldbränden in Australien 2019/2020 sind geschätzt mehr als eine Milliarde Säugetiere, Reptilien und Vögel ums Leben gekommen sind, dazu unzählige Insekten und Kleinlebewesen. Viele Verluste sind irreversibel, weil auch die Lebensräume der meisten Tiere verbrannt sind: 80 Prozent der Eukalyptusbäume im Weltnaturerbe der Blue Mountains und 20 Prozent der ältesten Urwälder Australiens.

49,6 °C im Westen Kanadas 2022 und 48,8 °C auf Sizilien 2023 (heißeste jemals in Europa gemessene Temperatur) sind Hitzerekorde, die ohne die vom Menschen verursachte Erderhitzung kaum möglich gewesen wären. Heiße Luft transportiert mehr Wasser, so dass die Niederschlagspitzen mit 162,4 mm in Belgien und Deutschland und 201,9 mm Regen an einem einzigen Tag in China extrem ausfielen. Massive Überschwemmungen haben 2022 Australien, Bangladesch und Südafrika heimgesucht, und in Pakistan flutete die größte in historischer Zeit je bekannte Überschwemmung ein Drittel der Landesfläche (WWA 2022), während andere Kontinente unter schweren Dürrekrisen litten.

Überall auf der Welt verlieren Menschen ihr Leben und ihre Lebensgrundlage, weil Hitzewellen, Überschwemmungen, Waldbrände und Dürren aufgrund der Klimakrise immer häufiger auftreten und tödlich enden. Mehr als 60.000 hitzebezogene Todesfälle hat es einer neuen Berechnung zufolge im Sommer 2022 in Europa gegeben, dem bisher heißesten Sommer auf dem Kontinent seit Beginn der Aufzeichnungen (Ballester et al. 2023). Schon jetzt sterben in Deutschland in Hitzesommern mehr Menschen an Hitze als im Straßenverkehr; 2018 – 2020 gab es in Deutschland rund 20.000 Hitzetote (Winkelmayr et al. 2022), 2022 kamen nochmal knapp 8.200 Opfer hinzu (Ballester et al. 2023). Zusammen heißt das, dass die Hitze der letzten fünf Jahre je einen von ca. 3.000 Einwohner\*innen vorzeitig das Leben gekostet hat.

Die Versauerung der Ozeane, Bodendegradation, Überfischung und Verlust der biologischen Vielfalt gehen weitgehend ungebremst weiter, mit zunehmend schwereren Folgen. Nach Schätzungen von Wissenschaftlern sind heute fast 90 % der marinen Hitzewellen auf die vom Menschen verursachte Erwärmung zurückzuführen (marine Hitzewelle bedeutet, dass an mindestens fünf aufeinander folgenden Tagen die Meeresoberflächentemperaturen höher sind als 90 % der Werte eines 30-jährigen Vergleichszeitraums für den jeweiligen Kalendertag und den gleichen Ort). Ihre zunehmende Stärke und Häufigkeit verringert die Chance, dass sich geschädigte Meeressysteme wie z.B. Korallenriffe wieder rechtzeitig erholen können.

Die Erderhitzung wird uns auch in Zukunft begleiten, so der Weltklimarat IPCC, WG1: „Die globale Oberflächentemperatur wird bei allen betrachteten Emissionsszenarien bis mindestens Mitte des Jahrhunderts weiter ansteigen. Eine globale Erwärmung von 1,5 °C und 2 °C wird im Laufe des 21. Jahrhunderts überschritten werden, es sei denn, es erfolgen in den kommenden Jahrzehnten drastische Reduktionen der CO<sub>2</sub>- und anderer Treibhausgasemissionen (IPCC 2021:

B.1). Erst nach Mitte des Jahrhunderts werden die Auswirkungen unterschiedlicher Politiken spürbar werden – entweder ein stagnierendes Temperaturniveau, bei radikalen Emissionssenkungen eine langsame Verringerung des Wärmeniveaus, oder ohne weltweite wirksame Klimapolitik eine übermäßige Erwärmung, bis die Gesellschaften zusammenbrechen und der Planet verwüstet ist. Nicht zuletzt deshalb ruft eine Gruppe internationaler Gesundheitsorganisation unter Führung der WHO nach einem „Nichtweiterverbreitungsvertrag“ für fossile Brennstoffe, analog zum Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Atomwaffen (WHO et al. 2022).

Der Kern jeder Klimapolitik ist und bleibt natürlich die drastische und schnelle Verringerung aller Treibhausgasemissionen. Auch die Bundesrepublik ist noch nicht auf einem Klimapfad, der der im Pariser Abkommen völkerrechtlich bindend festgelegten 1,5°C Erhitzungsgrenze gerecht würde, und die Umsetzung bleibt noch weit hinter den unzureichenden selbstgesetzten Zielen zurück. Angesichts der die nächsten 30 Jahre unvermeidlich weiter steigenden Temperaturen wird jedoch auch die Klimafolgen-Anpassung immer wichtiger. Das beginnt auf der lokalen Ebene

mit Überhitzungsvorsorge an Gebäuden, dem Angebot von Kühlräumen für hitzesensible Bürger\*innen, insbesondere für Ältere und Kleinkinder, geht über ein vorsorgendes Gesundheitssystem bis zur Wasserbewirtschaftung für Trinkwasser, Landwirtschaft und Industrie, sowie um einen dem Klimawandel angepassten Naturschutz.

Zwischen Anpassung und Vermeidung angesiedelt ist eine Gruppe von Vorschlägen, die versuchen, mit technischen Mitteln die Erderhitzung abzuschwächen, ohne jedoch die Emissionen zu verringern: das Geoengineering. Das soll durch Maßnahmen erreicht werden, die entweder der Erdatmosphäre Treibhausgase entziehen oder die die Erde erreichende Sonnenstrahlung abschwächen und so den Temperaturanstieg reduzieren.

Sowohl die Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre wie die Reduktion der Einstrahlung sind großtechnisch, müssen mindestens über Jahrzehnte beibehalten werden, und sind mit erheblichen Folgen für Natur und Umwelt verbunden. Kapitel 2 zeigt diese für CO<sub>2</sub>-Entfernung aus der Atmosphäre, und Kapitel 3 für die Reduzierung der Einstrahlung. Dabei wird auch

### Was ist Geoengineering?<sup>1</sup>

Der Sammelbegriff Geoengineering bezeichnet vorsätzliche, gezielte und großräumige Eingriffe mit technischen Mitteln in geochemische oder biogeochemische Kreisläufe der Erde mit dem Ziel, die vom Menschen gemachte (anthropogene) Klimaerwärmung zu mildern. Geoengineering soll nicht der Bekämpfung der Ursache des Klimawandels, also der Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen dienen, sondern der Moderation der Folgen, entweder durch Verringerung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentrationen oder durch Manipulation des irdischen Strahlungshaushalts.

Nach dieser Definition sind kleinräumige Eingriffe nur dann ein Teil von Geoengineering, wenn sie ubiquitär angewandt werden und sich so zu einem großräumigen Eingriff addieren. Dieser Eingriff muss zudem vorrangig auf eine Milderung der Klimaerwärmung zielen; Maßnahmen des Naturschutzes, die als positiver Nebeneffekt auch zu einer stärkeren Kohlenstoffbindung führen, sind nach dieser Definition nicht Teil des Geoengineerings. Eine Ausrichtung von Land- oder Forstwirtschaft auf Kohlenstofffixierung, unter Hintanstellung von Faktoren wie Bodenbiodiversität, Bodenfruchtbarkeit, Ertrag und Sozialverträglichkeit könnte dagegen Bestandteile von Geoengineering-Strategien sein.

<sup>1</sup> Der Begriff „Geoengineering“ wurde vermutlich von dem italienische Physiker Cesare Marchetti geprägt, der 1976 in seinem Aufsatz „Geoengineering and the Energy Island“ für ein globales Energiesystem, basierend auf einer Kombination von Atomkraftwerken, Schnellen Brütern und Hochtemperaturreaktoren mit Wasserstoff als Energiespeicher und ergänzenden erneuerbaren Energien plädierte.

deutlich, dass und warum der BUND diese Optionen ablehnt. Was wir stattdessen fordern wird in Kapitel 4 beschrieben.

Wettermodifikationen, die teilweise seit Mitte des 20. Jahrhunderts eingesetzt werden, zählt die Fachgemeinschaft in der Regel nicht zum Geoengineering und begründet das mit der unterschiedlichen räumlichen zeitlichen Auswirkung der Eingriffe. Wetter und Ribeiro (2016) vermuten als weitere Gründe zum einen die fragwürdige Wirksamkeit der Maßnahmen, und zum anderen die Möglichkeit, sie als Kriegswaffen einzusetzen – zwei Assoziationen, die für die Akzeptanz eher schädlich sind. Das gilt auch, weil Veränderungen des atmosphärischen Strahlungshaushalts die Windsysteme beeinflussen, und so z.B. Ort und Zeitpunkt der Monsunregen verschieben oder unterbrechen könnten, auf die Milliarden Menschen insbesondere in Westafrika, Indien und China für ihr Überleben angewiesen sind. Das zeigt sich in den wenigen Studien, die regionale Ansätze modelliert haben – eine ergab, dass die Umkehrung der Winde zwar eine Dürre in Nordafrika reduziert, dafür aber eine andere in Ostafrika verursacht (Ricke et al. 2021).

Es geht letztlich nicht um einzelne Technologien, sondern um ein grundlegend neues Verstehen des Verhältnisses von Natur und menschlichem Fortschritt. Letzterer hat nicht nur individuellen Wohlstand hervorgebracht (der sehr ungleich verteilt ist), sondern auch die Entwicklung zivilisatorischer Errungenschaften ermöglicht. Er hat aber auch fast immer negative und in der Regel nicht vorhergesehene Folgen gezeitigt, die von der Natur abgepuffert wurden. In der Vergangenheit hat die Menschheit noch nie die von ihr erzeugten Schadstoffe wieder aus der Umwelt und insbesondere der Atmosphäre entfernt, sondern nur die Produktion eingestellt und sich auf die Selbstreinigungskräfte des Planeten verlassen. Nicht ohne Erfolg: Das Ende der FCKW-Produktion durch das Montrealer Abkommen, und der schrittweise Ausstieg aus der Herstellung von Fluorkohlen-

wasserstoffen FKW durch das Kigali-Zusatzabkommen haben nicht nur zur Erholung der Ozonschicht geführt, sondern auch eine zusätzliche Erderwärmung um 0,3 – 0,5 °C bis 2100 vermieden (WMO 2022).

Je mehr wir aber die planetaren Grenzen überschreiten (bei fünf der neun Grenzen ist dies bereits der Fall: Persson et al. 2022), je näher wir den Kippunkten des Klimasystems kommen (Wunderling et al. 2021; Boulton et al. 2022; Boers 2021; Boers, Rypdal 2021), desto weniger kann die Natur diese Leistung erfüllen. Wir leben in einer Welt mit knappen Ressourcen, Quellen wie Senken. Geoengineering erfordert großmaßstäbliche Eingriffe – sie überschreitet eine Grenze, jenseits derer eine Pufferkapazität durch eine größere Umwelt nicht mehr gegeben ist und die Auswirkungen, auch die negativen, von Anfang an irreversibel sind.

## 2. Geoengineering I: Negative Emissionen & Carbon Capture

Die Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, auch als „negative Emissionen“ bezeichnet, spielt in den vom IPCC ausgewerteten Szenarien zur Verringerung der Treibhausgasemissionen eine wichtige Rolle zur Begrenzung der Klimakrise (IPCC 2022b). Szenarien mit Manipulationen der Sonneneinstrahlung hat das IPCC nicht untersucht.

Der aktuelle sechste Sachstandsbericht des IPCC 2021/2022 zeigt deutlich, wie schwierig es wird, 1,5°-Ziel noch zu halten. Er beschreibt zwei Gruppen von Szenarien als mit diesem Ziel vereinbar: diejenigen, die das verfügbare Treibhausgasbudget einhalten, bei dem die Klimaerwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% auf maximal 1,5 °C beschränkt werden kann und solche, die zwar den Zielwert überschreiten („Overshoot“), aber in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts durch „negative Emissionen“ die Erwärmung auf 1,5 ° zurückführen. Dabei fasst das IPCC diejenigen Szenarien, die keinen oder nur einen geringen Overshoot aufweisen (<0,1 °C) mit Szenarien ohne Overshoot als eine Gruppe zusammen. Nur Szenarien, die auf konsequente Energieeinsparung setzen und deshalb ohne „negative Emissionen“ auskommen, können nach Auffassung des BUND Grundlage einer zielführenden Klimapolitik sein, insbesondere wenn sie durch Überlegungen zu Postwachstum, nachhaltigem Konsum und Suffizienz weiterentwickelt werden.

Eine zweite Gruppe bilden Szenarien, die einen deutlicheren Overshoot beinhalten, der aber bis Ende des Jahrhunderts ausgeglichen wird. Alle übrigen Szenarien beinhalten eine längerfristige Erderhitzung von 2 °C und mehr, was zwar den gegenwärtigen Trends und politischen Selbstverpflichtungen entspricht, aber einen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Kollaps mit sich bringen würde. Solche Szenarien sind deshalb pauschal als zu gefährlich einzustufen und werden hier nicht weiter diskutiert.

Die Bewertung der Szenarien durch die drei Arbeitsgruppen des IPCC ist durchaus nicht einheitlich. Die Arbeitsgruppe WG1 beschäftigt sich ihrer Aufgaben-

stellung gemäß mit der Feststellung der gegenwärtig bekannten Daten ohne diese zu bewerten. Die Wissenschaftler\*innen der Arbeitsgruppe 2, die die Folgen der Erderhitzung für die menschliche Gesellschaft beschreibt, warnen dagegen in ihrem Abschlussbericht deutlich vor einer Entwicklung, wie sie die Szenarien mit deutlichem Overshoot beschreiben und weisen auf die resultierenden Verluste an Biodiversität und resultierende gesellschaftliche Verwerfungen hin. Sie halten auch das Vertrauen in „negative Emissionen“ für problematisch. Ganz anders die dritte, von Ökonomen bestimmte Arbeitsgruppe, die Overshoot als unvermeidbar und negative Emissionen als eine machbare Lösung darstellt (Pfade mit Overshoot sind darauf angewiesen, erfolgreiche „negative Emissionen“ anzunehmen, um die Rückkehr zu einer 1,5 °C-kompatiblen atmosphärischen Treibhausgas-Konzentration zu erreichen). Damit soll erreicht werden, dass es einen doppelten Wendepunkt von Erwärmung zu Abkühlung und anschließender Stabilisierung geben wird. Im Synthesebericht des IPCC taucht die Akzeptanz von Overshoot und negativen Emissionen in den Hauptthesen nicht auf, wird aber im Fließtext als Option mit beschrieben.

Aus Sicht des BUND, der sich dabei u.a. auf die Ergebnisse der IPCC WG2 stützt, sind Szenarien mit Overshoot keinesfalls gleichrangig zu Szenarien, die das Treibhausbudget einhalten, sondern akzeptieren unverantwortbare Risiken für Ökosysteme und die biologische Vielfalt durch die Abfolge von Temperaturanstieg und anschließender Rückführung. Das sieht auch die WG2 des IPCC so und betont „Falls die globale Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten oder später vorübergehend 1,5 °C übersteigt (Overshoot), werden viele menschliche und natürliche Systeme im Vergleich zu einem Verbleib unter 1,5 °C zusätzlichen schwerwiegenden Risiken ausgesetzt sein [...]. Je nach Ausmaß und Dauer der Überschreitung werden einige Folgen die Freisetzung zusätzlicher Treibhausgase verursachen [...] und manche Folgen werden unumkehrbar sein, selbst wenn die globale Erwärmung verringert wird (IPCC 2022a: B6).

So gibt es z.B. für das Abschmelzen der Eiskappen Kippunkte, d.h. Punkte, ab denen sich der Schmelzvorgang auch ohne weitere Erwärmung immer weiter fortsetzt. Das Eis bildet sich erst dann neu, wenn die Umgebungstemperatur deutlich unter die Ausgangstemperatur gesenkt wird, wie z.B. die jährlichen Prozesse an beiden Polkappen zeigen. Viele der Kippelemente des Klimasystems enthalten solche selbstverstärkenden Prozesse. Werden diese stärker als die stabilisierenden Prozesse, ist der Kippunkt erreicht und die Dynamik läuft auch ohne äußeren Antrieb weiter, teilweise irreversibel. Je länger und je stärker ein solcher Kippunkt überschritten wird, desto schneller und stärker entfalten sich normalerweise die selbstverstärkenden Prozesse (Steffen et al. 2018; IPCC 2018; 2021). Daher haben unsere heutigen Entscheidungen für viele Jahrhunderte bis Jahrtausende Auswirkungen auf künftige Generationen. Besonders beunruhigend ist dabei, dass nicht nur die unmittelbar mit einem Kippunkt zusammenhängenden Folgen ausgelöst werden können, sondern die Gefahr von Domino-Effekten besteht; bekannt ist, dass die Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen dazu neigen, das gesamte Netzwerk zu destabilisieren (Wunderling et al. 2021; McKay et al. 2022).

Ein Grund, warum diese Warnungen insbesondere bei Ökonomen auf wenig Resonanz stoßen, ist wahrscheinlich das Arbeiten mit Gleichgewichtsmodellen, die einen Gleichgewichtszustand nur vorübergehend verlassen und dann zu ihm zurückkehren – Systemstörungen sind als immer reversibel, das ist die implizite Annahme, und so werden Daten aus der Realität fehlinterpretiert. So wird angenommen, dass wenn nach einem Overshoot die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen wieder auf ein Niveau reduziert werden könnten, das heute einer Erderwärmung von 1,5 °C entspricht, sich der Vorerwärmungszustand bald wieder einstellen würde. Das stimmt schon rein physikalisch nicht, denn die Reaktion des Klimas auf akkumulierte Treibhausgase für ansteigende und sinkende atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ist unterschiedlich: Trägheiten im Kohlenstoffzyklus und im Meeresswärmehaushalt führen zu einer Hystere-

sis-Kurve. Dieses asymmetrische, pfadabhängige Verhalten ist noch nicht gut quantifiziert und stellt eine wichtige Wissenslücke dar (IPCC 2018). Zudem sind „Viele Veränderungen aufgrund vergangener und künftiger Treibhausgasemissionen [...] über Jahrhunderte bis Jahrtausende unumkehrbar, insbesondere Veränderungen des Ozeans, von Eisschilden und des globalen Meeresspiegels“ (IPCC 2021, B.5), stellt der Bericht IPCC WG 1 fest. Der Bericht der WG 2 ergänzt: „Eine zusätzliche Erwärmung, zum Beispiel über 1,5 °C während eines Überschreitungszeitraums in diesem Jahrhundert, wird zu irreversiblen Folgen für bestimmte Ökosysteme mit geringer Resilienz führen, wie zum Beispiel Polar-, Gebirgs- und Küstenökosysteme, die von Eisschild- oder Gletscherschmelze oder einem beschleunigten und höheren unvermeidbaren Meeresspiegelanstieg betroffen sind“ (IPCC 2022a: B.6). Eine weitere Studie zeigte zudem, dass selbst bei globaler Abkühlung viele Regionen noch für Jahrzehnte höhere Temperaturen als zuvor aufweisen könnten (Keys et al. 2022), eine Entlastung der Ökosysteme vom Klimastress also auch in diesem Falle nicht als sicher angenommen werden kann.

Erst recht existiert Reversibilität nicht in biologischen und noch weniger in sozioökonomischen Systemen (Allen 1998). Stattdessen stellt die Abfolge von erst Überhitzung und anschließender Abkühlung eine doppelte Belastung für die Biodiversität dar, wie der gemeinsame Workshop von IPBES und IPCC 2021 bestätigt hat (Pörtner et al. 2021). Beide Prozesse, Erwärmung und Abkühlung, führen zur Verlagerung von Lebensräumen, zur Störung von Nahrungsnetzen, zur Desynchronisierung von Multi-Spezies-Prozessen (Blüte und Erscheinen der Bestäuber, Reife von Schädlingen und Erscheinen ihrer natürlichen Gegenspieler, 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 unrealistisch. Eine Überschreitung der Grenze von 1,5 °

Klimaerwärmung mit anschließenden „negativen Emissionen“ ist also mit erheblichen ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Risiken verbunden. Das sieht auch der zweite Teilbericht des IPCC so: „Risiken für menschliche Systeme werden zunehmen, darunter Risiken für Infrastruktur, niedrig gelegene Küstensiedlungen, einige ökosystembasierte Anpassungsmaßnahmen und damit verbundene Existenzgrundlagen [...] sowie kulturelle und spirituelle Werte“ (IPCC 2022a: B.6.1). „Je nach Ausmaß und Dauer der Überschreitung werden einige Folgen die Freisetzung zusätzlicher Treibhausgase verursachen [...] und manche Folgen werden unumkehrbar sein, selbst wenn die globale Erwärmung verringert wird“ (IPCC 2022a: B.6). „Das Risiko schwerwiegender Folgen steigt mit jedem weiteren Zuwachs der globalen Erwärmung während einer Überschreitung [...]. In kohlenstoffreichen Ökosystemen (in denen derzeit 3.000 bis 4.000 GtC gespeichert sind) werden solche Folgen bereits beobachtet und werden laut Projektionen mit jedem weiteren Zuwachs der globalen Erwärmung zunehmen, zum Beispiel durch vermehrte Wald- und Flächenbrände, Massensterben von Bäumen, die Austrocknung von Torfgebieten und das Tauen von Permafrostböden, wodurch natürliche Kohlenstoffsinken an Land geschwächt werden und die Freisetzung von Treibhausgasen zunimmt [...]. Der daraus resultierende Beitrag zu einer potenziellen Verstärkung der globalen Erwärmung zeigt, dass eine Rückkehr zu einem bestimmten globalen Erwärmungsniveau oder darunter eine größere Herausforderung darstellen würde“ (IPCC 2022a: B.6.2).

In Anbetracht dieser Warnungen ist es schwer verständlich, dass der dritte Teilbericht des IPCC Szenarien mit deutlichem Overshoot, die erst zur nächsten Jahrhundertwende wieder das 1,5°C-Ziel erreichen, als mit den Klimazielen vereinbar einstuft, und feststellt „Der Einsatz von Methoden zur Entnahme von CO<sub>2</sub> (Carbon Dioxide Removal, CDR), um schwer zu vermeidende Restemissionen auszugleichen, ist unvermeidlich, wenn netto Null CO<sub>2</sub>- oder Treibhausgasemissionen erreicht werden sollen“ (IPCC 2022b:

C.11). Diese Notwendigkeit ergibt sich allerdings daraus, dass selbst bei den modellierten Pfaden, die die Erwärmung ohne oder mit begrenzter Überschreitung auf 1,5 °C (> 50 % Wahrscheinlichkeit) begrenzen, der globale Einsatz von Kohle, Öl und Gas im Jahr 2050 laut Projektionen immer noch 5 % der Kohle, 40 % des Öls und 55 % des Gasverbrauchs von 2019 beträgt (Medianwerte) (IPCC 2022b: C.3.2). Auch an dieser Stelle wird wieder deutlich, wie groß die Diskrepanz ist, die zwischen den katastrophalen Auswirkungen liegt, die die meisten Naturwissenschaftler als Auswirkungen der Klimakrise erwarten, und den eher bescheidenen Schätzungen der Schäden, die von den meisten Wirtschaftswissenschaftlern berechnet werden (Rising et al. 2022). Diese gehen zudem davon aus, dass das Wirtschaftswachstum unverändert weitergeht (eine überaus fragwürdige Annahme, wie Spangenberg und Kurz 2023 zeigen) und damit auch der Energieverbrauch weiter ansteigt. Andere Analysen kommen zu dem Ergebnis, dass eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien möglich ist (Speicherkapazitäten eingeschlossen), international (Moriarty, Honnery 2020) wie national (BUND 2017). Allerdings würde das eine deutliche Senkung des Primärenergieverbrauchs erfordern, in Deutschland um Rund die Hälfte (wobei die hohe Nutzungseffizienz der Elektrifizierung hilft). Ohne Energiesparen gibt es keine Energiewende.

Diese unterschiedlichen Zielzahlen bestimmen schon heute Rechtssetzung und Investitionen (Buck et al. 2023). Wenn Gasterminals, Gas- und Wasserstoffpipelines, CO<sub>2</sub> Endlagerstätten und andere Infrastrukturen rechtzeitig vorhanden sein sollen, muss heute geplant, beschlossen und investiert werden – und das passiert, unter der Annahme eines weiter steigenden Energieverbrauchs und damit hoher Restmengen, die durch „negative Emissionen“ wieder aus der Luft entfernt werden sollen. Werden langfristig hohe Verbrauchsmengen an fossilen Energieträgern unterstellt, dann ergibt es für die Politik Sinn wie die Bundesrepublik langfristige Lieferverträge anzustreben, wie die Niederlande und England zu versuchen neue Gas-

felder zu erschließen oder gar wie England neue Kohlebergwerke zu genehmigen. Nur dann sind auch die Milliardeninvestitionen von ExxonMobile, Shell und BP in neue Bohrungen, auch in unkonventionelle (und damit hoch CO<sub>2</sub>-intensive) fossile Lagerstätten sinnvoll. Will man sich dagegen nicht auf die erhoffte Wirksamkeit einer Technologie verlassen, die im großen Maßstab bisher noch nie ohne schwere Probleme betrieben wurde, dann ist Energiesparen notwendig (mindestens 3% weniger Energieverbrauch jährlich weltweit schätzen Welsby et al. 2021), die Investitionen sind in den Sand gesetzt, die Infrastrukturen überdimensioniert und die Politik auf dem falschen Gleis. Wenn ein Großteil der fossilen Reserven im Boden bleiben muss, werden die Kurswerte der Firmen, deren Kurs sich auf den Zugriff auf diese Ressourcen stützt, an den Börsen einbrechen, jetzt, und nicht erst 2050. Die Weichenstellung für die Zukunft erfolgt jetzt, und sich auf „negative Emissionen“ zu verlassen bedeutet, die ganze Zukunft der menschlichen Zivilisation auf eine Karte zu setzen.

Deswegen fordert der BUND die Bundesregierung auf

- **ihre Klimapolitik, wie vom Verfassungsgericht verlangt, auf die Einhaltung der 1,5 °C Obergrenze auszurichten, ohne Overshoot zuzulassen. Szenarien mit Overshoot sind keine geeignete Grundlage für eine erfolgreiche Klimapolitik.**
- **Die Energieeinsparung mit rechtlichen und ökonomischen Instrumenten verstärkt voranzutreiben und das Ziel einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs in Deutschland um 50% bis zur Mitte des Jahrhunderts umzusetzen.**
- **Nicht alles auf eine Karte zu setzen, und sich aus wirtschaftlichen wie aus Umweltgründen nicht auf die technische Abscheidung von CO<sub>2</sub> und seine sichere Endlagerung als Grundlage zukünftigen Wirtschaftens zu verlassen.**

**“We must be prepared for CDR [Carbon Dioxide Removal] to be a failure, leaving us to rely on the**

**environment to stabilize atmospheric CO<sub>2</sub> over thousands of years. This is another argument for rapid decarbonization.”**

**David T. Ho 2023**

Nicht nur Klimaentwicklungen, die Geoengineering und „negative Emissionen“ notwendig machen, sind jedoch mit hohen Risiken verbunden, auch die vorgeschlagenen Maßnahmen mit dem Ziel, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre oder aus Abgasströmen einzufangen und zu binden, sind kritisch zu betrachten (BUND 2023).

Dieses Ziel kann aktiv durch die Abscheidung von CO<sub>2</sub> und seine Speicherung im Untergrund (siehe Kap. 2.2-2.3), oder passiv durch biologische oder chemische Prozesse verfolgt werden (die aber als Bestandteil von Geoengineering aktiv unter z.T. hohem Energie- und Materialaufwand stimuliert werden müssen, Kap. 2.1, 2.4). Keines dieser Verfahren stellt eine Rechtfertigung für oder eine Alternative zu weniger nachdrücklich betriebener Dekarbonisierung dar. So zählen die größten verfügbaren Anlagen zur Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> (vier „Direct Air Capture“ Anlagen in den USA, in Bau für je knapp 1 Mrd US\$, und die CO<sub>2</sub>-Endlager in ehemaligen Gaslagerstätten in Europa jeweils über eine Kapazität von rund 1 Mio t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Bei jährlichen Emissionen von 40,5 Mrd t CO<sub>2</sub> (Friedlingstein et al. 2022) entspricht das der Entfernung der Emissionen von 13 Minuten im Laufe eines Jahres. Selbst wenn jeder Mensch einen Baum pflanzen würde, also 8 Mrd. Bäume weltweit, würden diese – wenn ausgewachsen – lediglich die heutigen Emissionen von 43 Stunden kompensieren (Ho 2023). „Negative Emissionen“ sind in dieser Situation weitgehend nutzlos und erst nach weitestgehender Dekarbonisierung relevant.

Die in der Diskussion befindlichen Verfahren beschreiben wir im Folgenden.

## 2.1 Marine CO<sub>2</sub>-Senken

Das aktuelle Interesse an marinem Geoengineering speist sich aus der Hoffnung von Wissenschaftler\*innen, Start-up Unternehmen und Risikokapital-Investoren, durch geeignete Techniken CO<sub>2</sub> Sequestrierungszertifikate generieren und sich damit einen signifikanten Marktanteil des sich entwickelnden Multi-Milliarden Dollar Markts für diese „Carbon Credits“ zu sichern (Tollefson 2023). Besorgniserregend ist, dass nicht nur die Wirtschaft mit ihrer Werbung den Eindruck erweckt, auf diese Weise das Klimaproblem technisch lösen zu können, sondern auch Teile der Wissenschaft. Sie haben sich in den letzten Jahren zu großen Verbänden zusammengeschlossen, die mit öffentlichen Mitteln gefördert werden (OceanNETs Projekt der EU, Ocean Visions in den USA). Darüber hinaus haben die US-amerikanischen National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) bereits 2021 für das nächste Jahrzehnt die Aufstockung der Forschungsmittel für marines Geoengineering von 125 Mio US\$ auf 2,5 Mrd US\$ gefordert, darunter auch für Feldversuche zur Meeresalkalinisierung (Anreicherung von Basen im Meerwasser) (Voosen 2022). Ähnlich sieht auch Teil 3 des IPCC-Berichts trotz des begrenzten derzeitigen Einsatzes die geschätzten Minderungspotenziale für verstärkte Verwitterung (enhanced weathering – EW) und ozeanbasierte Methoden zur Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre (einschließlich Erhöhung der Alkalinität des Ozeans und Ozeandüngung) als mäßig bis groß an (Pathak et al. 2022). Alle bisher diskutierten Verfahren sind energie- und emissionsintensiv, und der Materialbedarf wäre nahezu unbegrenzt, da die Ozeanadditive in der Regel nur einen Monat wirksam sind, bevor sie verdünnt und verteilt werden.

### 2.1.1 Ozeandüngung

Die größte natürliche Senke für CO<sub>2</sub> sind die Ozeane: sie haben über 30 Prozent des bisher emittierten anthropogenen Kohlendioxids aufgenommen. Das CO<sub>2</sub> ist im Meerwasser als Kohlensäure gelöst und damit die Ursache der für die marine Biodiversität schädlichen Ozeanversauerung (IPCC 2021). Der

gelöste anorganische Kohlenstoff wird insbesondere durch das pflanzliche Meeresplankton, welches etwa die Hälfte der weltweiten Photosynthese-Leistung erbringt (Leujak et al. 2011), in organischen Kohlenstoff überführt. Über die Nahrungskette gelangt dieser in weitere Meeresorganismen wie Kleinkrebse, Fische oder Wale, die – wie alle tierischen Lebewesen – in ihrem Verdauungsprozess einen Teil des gebundenen organischen Kohlenstoffs wieder als CO<sub>2</sub> freisetzen. Sterben diese Organismen oder das Plankton, sinken sie meist ab. Ein Großteil der nicht in den Nahrungsnetzen verwerteten 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 sehr 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 Kohlenstoffs auf Dauer dem Austausch mit der Atmosphäre entzogen ist, sofern das Sediment nicht im Laufe von Jahrtausenden bakteriell abgebaut wird – das ist die sog. biologische Pumpe (DFG 2018, Salter et al. 2014). Selbst wenn es gelänge, die Menge der den Ozeanboden erreichenden Biomasse zu erhöhen, würde eher der bakterielle Abbau verstärkt, und da dieser Sauerstoff verbraucht, würden die sauerstofffreien Todeszonen am Meeresboden sich ausweiten.

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 in Eisenmangelregionen das Planktonwachstum anregen, so dass sich die Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre verstärken würde. Damit verbunden war die Hoffnung, so könnte letztlich mehr Kohlendioxid durch die abgestorbene Biomasse in die Tiefsee transportiert werden (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. Der größte Teil der Plankton-Biomasse geht in den Nahrungskreislauf ein, wird gefressen und dabei der gespeicherte Kohlenstoff wieder als CO<sub>2</sub> freigesetzt (Fuss et al. 2018). Experimente haben diese kritische Einschätzung schon in den 1990er und 2000er Jahren bestätigt. Damals wurde in 13 Feldexperimenten der Zugabe von Eisen zu nährstoffarmen Gebieten an der Meeresoberfläche getestet. Die Experimente zeigten, dass man mit Eisendüngung Phytoplanktonblüten anregen kann, die Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen, aber auch, dass der meiste Kohlenstoff nicht in der Tiefsee transportiert und dort gespeichert, sondern im Rahmen der marinen Nahrungsketten kurzfristig wieder freigesetzt wurde (Ricke 2023). Eine Studie zur natürlichen Eisendüngung im Südpolarmeer hat sogar gezeigt, dass zusätzliches Eisen die Wirksamkeit der biologischen Pumpe, die Kohlendioxid aus den oberen Wasserschichten in die Tiefsee transportiert, reduzieren kann (Salter et al. 2014). Trotzdem werden die Experimente fortgesetzt, z.B. durch 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). Im April 2022 verteilten Forscher des Centre for Climate Repair an der Universität Cambridge zusammen mit dem indischen Institute of Maritime Studies eisenbeschichtete Reishülsen im Arabischen Meer ohne schlüssiges Ergebnis (Voosen 2022). Daneben kann Eisendüngung dazu führen, dass sich neben Phytoplankton auch Kalkschalen bildende Meeresbewohner vermehren, welche sich von den Algen ernähren. Das vorher im Wasser als Bikarbonat gelöste CO<sub>2</sub> wird dabei in Muschelkalk umgewandelt – ein großer Beitrag zur Kohlenstofffixierung. Sterben diese Lebewesen jedoch in einem Meeresgebiet mit einem hohen natürlichen Eiseneintrag, werden dort bis zu 30% weniger Kohlendioxid

in die Tiefsee verfrachtet als früher angenommen (Salter et al. 2014).

Der geringen Klimawirksamkeit der Ozeandüngung 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 (Salter et al. 2014). Algenarten, die bei höherer Nährstoffzufuhr schneller wachsen bzw. die schnell besonders viel CO<sub>2</sub> aufnehmen, verdrängen andere Algen (Ziebarth 2010). Eine solche Artenverschiebung kann sich auf die Nahrungsnetze und damit auf das gesamte Ökosystem auswirken. Eine hohe oberflächennahe Algendichte ändert zudem die Albedo der Meeresoberfläche; Bach et al. (2021) schätzen, dass dadurch die Klimaerhitzung stärker gefördert wird als sie durch eine potentielle parallele Kohlenstoffabsorption verringert würde.

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 Meeresgebieten 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. Auch das IPCC warnt „Ozeandüngung könnte, wenn durchgeführt, zu einer Nährstoffumverteilung, einer Umstrukturierung der Ökosysteme, einem erhöhten Sauerstoffverbrauch

und einer Versauerung in tieferen Wasserschichten führen“ (Nabuurs et al. 2022: C.11.2).

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.

Ähnlich beschränkte Wirkungen fanden Bach et al. (2021) bei Untersuchungen mit der freischwimmenden Braunalge Sargassum im (sub)tropischen Atlantik. Die Versuche einer „Aufforstung der Ozeane“ mit kohlenstoffbindenden Algen fanden, dass durch die Reallokation von Nährstoffen und durch die Kalkschalenbildung die erwartete CO<sub>2</sub>-Absorption um 20–100% sank, und dass die Diffusion von CO<sub>2</sub> ins Meerwasser 2,5–18 mal so lange brauchte wie das weniger CO<sub>2</sub>-haltige Wasser dem Kontakt mit der Atmosphäre überhaupt ausgesetzt war (Bach et al. 2021). Dennoch gehen die Experimente weiter: seit Februar 2022 haben Forscher\*innen versucht, Kohlenstoff zu binden, indem sie Riesentang vor der Küste Namibias kultiviert haben – um so einen kohlenstoffhungrigen Unterwasserwald zu schaffen (Voosen 2022).

### 2.1.2 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 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub> 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 (Kalk) 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. Die technische Umsetzung kann unterschiedlich aussehen, ist aber immer mit hohem Energie- und Materialverbrauch, ökologischen Schäden an Land und Meer und nur schwer verifizierbaren Klimaeffekten verbunden. So wurde von Vesta, einem Start-up Unternehmen aus San Francisco 2023 die Nutzung von aus Norwegen importierten Olivin<sup>2</sup> getestet: es sind 1,4 t Gestein zur Bindung von 1 t CO<sub>2</sub> im Laufe von 15 bis 500 Jahren notwendig. Das Gestein ist zudem häufig mit Schwermetallen wie Nickel und Chrom belastet und

<sup>2</sup> Olivin (oder Chrysolith) ist ein Silikatmineral vulkanischen Ursprungs mit der Formel (Mg,Fe)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>].

wird so in die marinen Ökosysteme eingebracht (Tollefson 2023). Andere Firmen wie Planetary Technologies aus Kanada wollen mit Hilfe von Magnesiumhydroxid-Schlämmen das Meerwasser basischer machen, da die länger im Wasserkörper verbleiben als natürliche Minerale. Ihre Herstellung ist aber so energieintensiv, dass selbst Klimaneutralität nur schwer zu erreichen war (Tollefson 2023). Erfolgreicher war der Versuch mit Kalk angereichertes Meerwasser zu nutzen. In einem Kleinversuch in Florida (Apalachicola-Mündung) 2022 konnte zwar gezeigt werden, dass so ein Teil des Säuregehalts neutralisiert und der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  entzogen wurde. Eine Lösung ist das aber nicht, weil bei der Erhitzung von Kalkstein zur Herstellung von Kalk mindestens so viel Kohlendioxid freigesetzt wird, wie die gewünschte erhöhte Aufnahme durch den Ozean wieder aus der Atmosphäre entfernt (Voosen 2022).

Damit durch die beschleunigte Verwitterung ein globaler Effekt erreicht wird, müsste für die benötigte Menge an Mineralien also neuer Bergbau in großen Dimensionen etabliert und eine großindustrielle Fertigung aufgebaut werden. Nach DFG (2018) wird geschätzt, dass für eine weltweite Kompensation des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes pro Jahr Mineralien in einem Umfang ausgebracht werden müssten, die der Menge der heutzutage abgebauten Kohle entspricht. In der Summe wäre diese Methode, Kohlendioxid aus der Luft zu entfernen (oft als CDR bezeichnet, für Carbon Dioxid Removal), kostspielig, energieintensiv und auch an Land mit großen Eingriffen verbunden (weitere Details finden sich im DFG-Schwerpunktprogramm SPP 1689). Die damit verursachten signifikanten neuen Stoffströme führen entlang der Kette von Abbau über Verarbeitung bis zum Einsatz zu einer Vielzahl von Umwelt- und Gesundheitsfolgen.

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.o.), möglicherweise aber auch giftig wirkende Verunreinigungen, was zu unbeabsichtigten Nebenwirkungen auf Meeresökosysteme führen könnte.

## 2.2 CCS Carbon Capture and Sequestration

Die Idee, Kohlendioxid bei der Energiegewinnung abzuscheiden und in geologischen Lagerstätten bzw. in der Tiefsee zu speichern ist ein halbes Jahrhundert alt. Schon 1977 schlug Marchetti vor,  $\text{CO}_2$  an der Quelle abzuscheiden und in die Tiefseeströmung einzuleiten, die bei Gibraltar vom Mittelmeer in den Atlantik fließt; die Tiefsee habe ein ausreichendes Speicherpotenzial, über das (damals noch sehr weit entfernte) Jahr 2100 hinaus (Marchetti 1977). Auch heute ist CCS kein kurzfristig verfügbares Verfahren; das IPCC rechnet erst in der zweiten Jahrhunderthälfte mit einer Realisierung in der klimapolitisch notwendigen Größenordnung. **CCS kann also nicht substantiell dazu beitragen, das Klimabudget einzuhalten und ist nur relevant, wenn man einen „Overshoot“ zulassen will.** Zudem ist das Gesamtpotenzial zur dauerhaften Speicherung von  $\text{CO}_2$  im Untergrund begrenzt; es besteht aus

1. ausgeförderten Erdöl- und Erdgas-Feldern,
2. tiefen salinaren Aquiferen (Salzwasser führende poröse Gesteinsschichten) (a) offshore (b) onshore,
3.  $\text{CO}_2$ -Injektion zur Erhöhung der Lagerstättenausbeute in Erdöl- und Erdgasfeldern,
4.  $\text{CO}_2$ -Nutzung bei der Flözgasgewinnung.

Während bei den ersten beiden Verfahren die Sicherheit der langfristigen Lagerung noch mit vielen Unsicherheiten behaftet ist (u.a. die Dauerdichtigkeit der zahlreiche Perforationen der ehemaligen Öl- und Gasfelder, Gasverteilungsverhalten bei Einbringung in tiefe Aquifere unter Überdruck) sind die beiden anderen Verfahren erprobt, da hier die  $\text{CO}_2$  Einlagerung nur ein Mittel zum Zweck, der Zweck selbst aber die verstärkte Förderung von fossilen Energieträgern ist – nicht unbedingt ein Beitrag zum Klimaschutz. Deshalb sind Veröffentlichungen mit Vorsicht zu betrachten, die – wie das Global CCS Institute (2018) – das Gesamtpo-

tenzial aller Verfahren auf bis zu 10.000 Gt CO<sub>2</sub> weltweit schätzen (bei einem weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 36,6 Gt 2022). Zudem liegen die Speichermöglichkeiten meist weit entfernt von den CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen, was eine aufwändige CO<sub>2</sub>-Bindungstechnologie (Capture) vor dem und großflächige Infrastrukturen (Pipelines) für den Transport notwendig macht.

CCS wurde vor 10 Jahren nach gesellschaftlichen Protesten in Deutschland durch das Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (KSpG) reguliert und ist nur zu Demonstrations-Erprobungs- und Forschungszwecken erlaubt; eine Evaluation sollte über die weitere Anwendung entscheiden. Im Vorfeld des im KSpG angelegten Evaluierungsberichts 2022 haben von Seiten des federführenden Wirtschafts- und Klimaministeriums jedoch Vorfestlegungen für den „Hochlauf einer CCU/S Wirtschaft“ stattgefunden, maßgeblich von Industrieinteressen beeinflusst, weitgehend unter Ausschluss der Öffentlichkeit und ohne Abwägung von Folgewirkungen und Risiken.

**Die Endlagerung von CO<sub>2</sub> ist nicht mit der Reduktion der THG-Emissionen im Industriesektor gleichzusetzen. Es besteht faktisch keine Gleichwertigkeit (Äquivalenz) – weder unter Risikoaspekten noch im Hinblick auf die energetische Effizienz.** Die unterschiedlichen Bindungsverfahren sind ausnahmslos so energieaufwändig, dass der industrielle Gesamtenergieverbrauch deutlich anzusteigen droht, statt wie dringend notwendig, zu sinken. „Problematisch ist vor allem der enorme zusätzliche Energieaufwand für die Abscheidung, den Transport und die Speicherung. Der Einsatz der CCS-Technik erhöht den Verbrauch der begrenzt verfügbaren fossilen Rohstoffe um bis zu 40 Prozent“ warnt das Umweltbundesamt (UBA 2022). CCS-Subventionen, vor allem in die Nutzung von „blauen“ Wasserstoff oder für Abscheideanlagen und deren Betriebskosten, vergünstigen nun diesen zusätzlichen Energieverbrauch, so dass ein ressourcenschonender Ausbau der Erneuerbaren mit der wachsenden Energienachfrage nicht Schritt halten kann.

Auch wenn die Energie aus erneuerbaren Quellen käme, wären die ökologischen Folgen unvermeidbar: die Biomassenutzung steht in Konkurrenz zu Nahrung und Naturschutz, für die Stromerzeugung mittels Solarpanels und Windrotoren werden große Mengen knapper Rohstoffe benötigt. Ein erfolgreich eingeschlagener Dekarbonisierungspfad würde mit einer Gleichsetzung von Vermeidung und Endlagerung torpediert und es käme zu einer fatalen klimapolitischen Richtungsänderung – basierend auf fehlerhaften Grundannahmen. Das gilt nicht nur für die Energiewirtschaft, sondern für alle energieverbrauchenden Produktionsprozesse. Die Aussicht auf eine CCS-Transportinfrastruktur und damit verbundene Zuschreibung der „Klimaneutralität“ der Herstellung verleitet dazu, Umstellungen von Produktspektrum und Produktionsverfahren auf weniger klimabelastende Ansätze nicht zu priorisieren. Wie schädlich das für das Klima ist, haben Slameršak et al. (2022) gezeigt, dass die Emissionen in Szenarien mit geringerem Energieverbrauch und einer raschen Dekarbonisierung der Energieversorgung durch den Übergang zu einem erneuerbaren Energiesystem niedriger sind. Dagegen haben Szenarien, in denen die Nutzung konventioneller fossiler Brennstoffe durch den Einsatz „negativer Emissionen“ ausgeweitet wird wesentlich höhere Emissionen.

### 2.2.1 CCS – damals an fossilen Kraftwerken, heute an Stahl- und Zementwerken

Vor gut 10 Jahren wurde die CCS-Technologie intensiv diskutiert, als Methode zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Kohlekraftwerken. Sie sollte eine „Brückentechnologie“ in die Nach-Kohle-Zeit sein, wurde aber schon damals als ungeeignet kritisiert. Inzwischen spricht man von CCS/U, wobei das U für „Utilisation“ steht, also die Nutzung des abgeschiedenen CO<sub>2</sub> in industriellen Prozessen. Das verringert zwar die Probleme mit der sicheren Endlagerung von Kohlendioxid, ändert aber nichts an den Problemen mit der und den Bedenken gegen die CO<sub>2</sub>-Abscheidung. CCS und CCU, die auf fossiles CO<sub>2</sub> angewendet werden, gelten nicht als Entnahmetechnologien. CCS und

CCU können zu den CDR-Methoden gerechnet werden, wenn das CO<sub>2</sub> biogen oder direkt aus der Umgebungsluft abgeschieden und dauerhaft in geologischen Reservoiren oder Produkten gespeichert wird.

Zwar sind die Einzelkomponenten Kohlendioxid-Abscheidung und Speicherung in kleinem Maßstab bekannt, jedoch handelt es sich um eine fragwürdige Technik: 10–50% der CO<sub>2</sub>-Emissionen werden (je nach Verfahren der Abscheidung) nach wie vor freigesetzt. 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 die problemlos laufen würde (EEA 2020). CCS kann auch deshalb keine Lösung für fossile Emissionen sein, weil die Technik ist nach aktuellem Erkenntnisstand nicht „skalierbar“, d.h. auf die für den Klimaschutz notwendigen Mengen in den verfügbaren Zeiträumen (von ca. zwei Jahrzehnten) ausbaubar ist. Derzeit sind weltweit 18 Anlagen zur direkten Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft in Betrieb (in der EU, den USA und Kanada), die zusammengenommen weniger als 0,01 Mio. t CO<sub>2</sub>/Jahr abscheiden; eine Reihe größerer Demonstrations- und Pilotprojekte ist in Vorbereitung. Die überwiegende Mehrheit der derzeitigen Anlagen fängt CO<sub>2</sub> zur Nutzung ab, z. B. um Getränke zum Sprudeln zu bringen – nur zwei Anlagen lagern das abgeschiedene CO<sub>2</sub> in geologischen Formationen zur Beseitigung ein (IEA 2022).

Die endgelagerte Menge beträgt rund 7 Mt/Jahr, davon 1,55 Mt/Jahr in Europa in den norwegischen CO<sub>2</sub>-Deponien Sleipner (in Betrieb seit 1996) und Snøhvit (seit 2007) – ein verschwindend kleiner Bruchteil der globalen Emissionen von 36.600 Mt/a. Diese zwei Endlager werden häufig, auch in Deutschland, als Beweis angeführt, dass die Technik erprobt und ihre Eignung für den großmaßstäblichen Einsatz erwiesen sei. Tatsächlich aber zeigen die Erfahrungen der beiden Endlagerstätten eher das Gegenteil: eine Studie des Institute for Energy Economics and Finan-

cial Analysis aus dem Jahr 2023 zeigt auf, dass die Projekte trotz Einsatz von Spitzentechnologie und umfassender technischer Voruntersuchungen mit großen Problemen zu kämpfen hatten: An beiden Standorten hat sich das CO<sub>2</sub> signifikant anders verhalten als es die detaillierten geologischen Feldbeurteilungen an diesen zu den bestuntersuchten Standorten weltweit gehörenden Lagerstätten vorhergesagt haben (Hauber 2023):

- In der Deponie Sleipner stieg das CO<sub>2</sub> nach einigen Jahren Betrieb plötzlich in viel höhere Schichten auf als erwartet, was für den Aggregatzustand des CO<sub>2</sub> kritisch sein kann. Bis heute lässt sich trotz aufwändiger Untersuchungen nicht sicher vorhersagen wohin es sich ausbreitet.
- An der Deponie Snøhvit musste die Verpressung schon im zweiten Jahr wegen übermäßigen Druckanstiegs plötzlich abgebrochen werden. Es stellte sich heraus, dass die Lagerstätte nur ca. ein Zehntel des angenommenen Fassungsvermögens hatte. Die Deponie musste aufgegeben und aufwändige Ersatzpläne schnell umgesetzt werden, um eine Katastrophe zu verhindern.

Solche unvorhergesehenen Entwicklungen zeigen, wie falsch die Vorstellung ist, dass die CCS-Technik sicher und effizient von einer auf andere geologische Stätten übertragen und auf ein Vielfaches skaliert werden könnte. Auch dass die notwendige und in diesen Fällen erfolgte jahrzehntelange Überwachung nach der Stilllegung sorgfältig umgesetzt würde, ist international eher unwahrscheinlich. Die Regierungen, in deren Verantwortung die Endlager nach einigen Jahren übergehen, sind nicht ausgestattet, um die komplexen CCS-Projekte zu überwachen, zu regulieren und möglicherweise selbst zu betreiben: die notwendigen finanziellen Reserven von mehreren 100 Mrd. Euro oder Dollar stehen nicht immer bereit, um in Fällen wie dem Versagen von Snøhvit schnelle Ersatzlösungen finanzieren zu können. Auch das von HeidelbergCement im Herbst 2021 angekündigte Projekt, in seinem Zementwerk im Süden Norwegens die weltweit erste CCS-Anlage in industriellem Maß-

stab zu errichten (Projekt „Longship“ – zahlreiche andere Projekte in den letzten Jahren wurden eingestellt) ist trotz günstiger Bedingungen und norwegischen Subventionen von 1,54 Mrd Euro auf Endlager wie Sleipner und Snøhvit angewiesen, mit den genannten Risiken. Unter diesen Umständen irreversible Fakten zu schaffen wie durch den von Wirtschaftsminister Habeck Anfang 2023 vereinbarten den Import von fossilem Wasserstoff (aus Erdgas) aus Norwegen sowie den Export von CO<sub>2</sub> und den Bau von H<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Pipelines durch die Nordsee ist aus Sicht des BUND ebenso falsch wie die Unterstützung der CCU/S-Pläne der Industrie und die Zusage, dazu den Meeresschutz einschränken zu wollen.

### **Die Gefahr, dass CCS am Ende gar nicht funktioniert, ist real.**

Bei CCS-Projekten insgesamt dominiert die Abscheidung zur verbesserten Ölförderung: knapp drei Viertel der weltweit ca. 39 Mt jährlich abgeschiedenen CO<sub>2</sub> weltweit wird in Ölfelder injiziert um die Ölextraktion zu intensivieren (Robinson 2022).

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 (Neumann 2010; UBA 2022). Ineffizient ist CCS, weil schon die CO<sub>2</sub>-Extraktion mit verschiedenen Gaswäsche- und Absorptionsverfahren erhebliche Mengen an Energie kostet. Kraftwerke und Industrieanlagen mit CCS würden 15–25% mehr Primärenergie verbrauchen, was unmittelbar die Emissionen an anderen Schadstoffen erhöhen würde, insbesondere Feinstaub und N<sub>2</sub>O (EEA 2011). Der Transport zu den mengenmäßig begrenzten und meist weit vom Ort der Entstehung entfernten Einlagerungsmöglichkeiten per Bahn, LKW, Pipeline und Schiff erfordert ebenfalls viel Energie.

Zu teuer ist CCS nicht nur wegen der Anlagen- und Energiekosten, sondern weil die Kosten der Erzeugung von Strom aus Windenergie und Photovoltaik in den letzten 10 Jahren so drastisch gesunken sind, dass Verbrennungskraftwerke mit CCS, die in den Szenarien der IPCC WG III eine bedeutende Rolle spielen, sich ökonomisch nicht rechnen. Umweltrisiken entstehen, wenn die dauerhafte Ablagerung von CO<sub>2</sub> zu Schäden in den Grundwasserkörpern und dauerhafter Beeinträchtigung des Grundwassers führen. Das gilt für die Einlagerung in Aquiferen ebenso wie für Prozessschäden wie die Verbindung zuvor getrennter Grundwasserschichten durch die Einbringung mittels Bohrungen; saline Wässer können die wertvollen nutzbaren Grundwasserleiter kontaminieren. Ausgeschöpfte Erdgas-Felder unter der Nordsee wurden lange als geeignete CO<sub>2</sub>-Speicher angesehen, aber neuere Messungen an solchen Feldern zeigen signifikante Methanemissionen (Lebel et al. 2020), die durch die Druckverhältnisse entstehen (Vielstädte 2017) und nach einer CO<sub>2</sub>-Verpressung zunehmen könnten. Insofern ist eine politische Regulierung unter besonderer Berücksichtigung der langfristigen Emissionsrisiken dinglich, für CCS ebenso wie für die nachfolgend genannten Ansätze mit Einlagerung von Kohlendioxid in terrestrische oder marine unterirdische Lagerstätten.

**Aus all diesen Gründen ist die öffentliche Akzeptanz wie die Förderung für CCS-Technologien gering;** auch das IPCC konzidiert, dass die beschriebenen Entwicklungspfade „inadäquate Annahmen bezüglich der Entwicklung der gesellschaftlichen Unterstützung und der Governancestrukturen“ machen (IPCC 2018). Ob die CCS/U-Pläne der Bundesregierung, die internationalen Vereinbarungen und die Pilotprojekte hier einen Unterschied machen werden, oder ob die Projekte wie ihre Vorgänger irgendwann aus Kosten- und Akzeptanzgründen eingestellt werden, ist noch nicht abzusehen.

Anders als die Anwendung von CCS um eine angeblich „saubere Kohle- bzw. Gasverbrennung“ zu errei-

chen sind Techniken sinnvoll, die CO<sub>2</sub> aus Biogasanlagen nutzen, wobei Nutzung eigentlich nicht unter CCS (S = storage, Speicher) fällt, sondern unter CCU, wobei U = Use bedeutet. In diesen Fällen muss das CO<sub>2</sub> 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 der Höhe der unvermeidlichen Restemissionen gerechtfertigt, da ohne die Optionen CCS und BECCS (s.u.) das Ziel der Netto-Null-Emissionen nicht erreichbar sei. Grundlage dieser Berechnungen sind jedoch wie erwähnt Szenarien, die auch bis 2050 mit dem Einsatz erheblicher Mengen an fossilen Brennstoffen rechnen, so 55% des Erdgasverbrauchs von 2019. Kostenargumente sind dagegen mehr in den Hintergrund getreten, weil einerseits die Kosten von erneuerbarer Energie so stark gesunken sind, andererseits aber auch, weil eine neue Generation von Modellen genutzt wurde, die nur noch zum Teil auf Kostenminimierung programmiert sind (Spangenberg, Polotzek 2019).

### **2.2.2 Direct air carbon dioxide capture and storage (DACCS)**

Die direkte Luftentnahme zur Extraktion von CO<sub>2</sub> (DAC, mit Ablagerung DACCS) ist ein Teil der physikalischen Methoden zur CO<sub>2</sub>-Bindung. Dabei wird das CO<sub>2</sub> nicht dem Abluftstrom von industriellen Anlagen wie z.B. von Zementwerken entnommen, wo die CO<sub>2</sub>-Konzentration höher und deswegen Energieverbrauch und Kosten geringer sind, sondern direkt der Atmosphäre, 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, das aber in der Öffentlichkeit wenig bekannt ist. Derzeit werden zwei technologische Ansätze verwendet: feste und flüssige DAC. Feste DAC (S-DAC) basiert auf festen Adsorbentien (Materialien, die das

CO<sub>2</sub> fest an sich binden), die bei Umgebungsdruck bis unter Vakuum und bei mittlerer Temperatur (80–120 °C) arbeiten. Flüssige DAC (L-DAC) nutzt eine wässrige basische Lösung (z. B. Kaliumhydroxid), die das gelöste CO<sub>2</sub> durch eine Reihe von Prozessschritten wieder freisetzen, die bei hohen Temperaturen (zwischen 300 °C und 900 °C) arbeiten (IEA 2022).

Der Energieaufwand ist immens – um 1 t CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> aus absorbierenden Stoffen wieder auszutreiben, um es weiter zu konzentrieren und einer Speicherung zuzuführen. Hier gelten die gleichen Restriktionen und Risiken wie beim Einspeichern von CO<sub>2</sub> in tiefer liegenden wasserführenden Schichten.

Energetisch ergibt DACCS keinen Sinn: Weil bei Verwendung fossiler Energieträger die CO<sub>2</sub> Emissionen wieder bei ca. 1 t CO<sub>2</sub> lägen, würde das Verfahren die Nutzung großer Mengen regenerativer Energien unbekannter Herkunft erfordern. Dagegen wäre die Vermeidung von Emissionen durch Nutzung der eben dieser Regenerativen zur Substitution fossiler Energieträger, und durch Effizienzsteigerungen eine Größenordnung kostengünstiger.

### **2.2.3 BECCS Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-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. BECCS spielt in den von der IPCC WG3 benutzten Szenarien eine wesentliche Rolle, auch wenn die Rolle von Bioenergie und BECCS im Vergleich zu den der Vorgängerberichten, insbesondere des SR15 (IPCC 2018), bekannt als „1,5 °C-Bericht“, reduziert wurde, weil die inzwischen durch-

geführten Studien breiter angelegte Emissionsminderungsportfolios einbezogen haben. Dazu gehört die Berücksichtigung der Reduzierung von Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen durch sozioökonomische Entwicklungen und den damit verbundenen Energie- und Nahrungsmittelbedarf, sowie Einsatzgrenzen für die Verfügbarkeit von Land für Wiederbewaldung und Aufforstung und für den Anbau von Pflanzen, die für Bioenergie und BECCS verwendet werden.

Dennoch erreicht in den Szenarien, die die Erwärmung auf 2 °C (> 67% Wahrscheinlichkeit) oder darunter begrenzen, das kumulative Volumen von BECCS 328 GtCO<sub>2</sub> für den Zeitraum 2020–2100. Zahlen für 1,5 °C finden sich weder in der Summary for Policy Makers der WG3 (IPCC 2022b), noch in der Technical Summary (Pathak et al. 2022) oder dem entsprechenden Kapitel des Gesamtberichts der WG3 (Nabuurs et al. 2022). Zum Vergleich: das Potenzial von DACCS wird mit 29 GtCO<sub>2</sub> für denselben Zeitraum angegeben.

Als Biomassequellen für Bioenergie und BECCS wird nicht nur Restbiomasse (organische Abfälle, Ernterückstände und Nebenströme in der Land- und Forstwirtschaft) genannt, sondern auch Anbaubiomasse aus Baumplantagen, Agroforstsystemen, Lignozellulosepflanzen und konventionellen Nahrungs- und Futtermittelpflanzen. Dabei kann z.B. der Energieaufwand für die Biomassegewinnung ebenso relevant sein wie der Effizienzverlust durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Das technische Netto-Potenzial von BECCS zur Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre (einschließlich Landnutzungsänderungen und anderer Emissionen aus der Lieferkette, aber ohne Substitution von Energieträgern) wird auf dieser Grundlage mit weltweit 5,9 GtCO<sub>2</sub>/Jahr bis 2050 berechnet, davon 0,08 GtCO<sub>2</sub>/Jahr zu Kosten von unter 10 US\$/t, 0,5 GtCO<sub>2</sub>/Jahr zu weniger als 20 US\$/t, und 1,8 GtCO<sub>2</sub>/Jahr zu einem Preis von unter 100 US\$/t (Nabuurs et al. 2022). Dabei wird allerdings nicht berücksichtigt, dass die staatlichen Programme zur Bioökonomie in fast allen industrialisierten Ländern

auf dieselben Biomassequellen zielen und eine Priorität der stofflichen vor der energetischen Nutzung postulieren. Wie sich dieser zunehmende Wettbewerb auf Preise und Kosten auswirken wird, ist noch kaum absehbar und wird vom Bericht auch nicht diskutiert.

Der Bericht weist aber auch auf die mit solchen Berechnungen verbundenen Ungewissheiten und Risiken hin: zum einen impliziert die technische Flächenverfügbarkeit nicht, dass die Produktion von Biomasse für Bioenergie und BECCS die effektivste Nutzung dieser Flächen für den Klimaschutz sei.

Zum anderen seien Bioenergie und BECCS mit einer Reihe von Zusatznutzen und unerwünschten Nebenwirkungen verbunden und eng mit den Nahrungsmittel-, Land- und Energiesystemen verknüpft. Es ist daher nicht möglich, das Ausmaß des Bioenergie- und BECCS-Einsatzes, bei dem die negativen Auswirkungen die Vorteile überwiegen, genau zu bestimmen (Nabuurs et al. 2022). Das IPCC sieht zudem Begrenzungen für BECCS – Biomasse durch den Energie-, Wasser- und Nährstoffbedarf ebenso wie in den begrenzten verfügbaren sicheren Endlagerungsmöglichkeiten und konkurrierenden Politikzielen (IPCC 2018). Als technologische und institutionelle Hindernisse für eine groß angelegte BECCS-Einführung nennt das IPCC den hohen Energiebedarf für CCS, die Begrenzung und die Kosten des Biomasseangebots und der geologischen CO<sub>2</sub>-Senken in mehreren Regionen sowie die Kosten der CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien (Nabuurs et al. 2022). Auch deshalb hängt die technische Durchführbarkeit von BECCS von Investitionen in fortschrittliche Bioenergietechnologien und deren Einführung ab, die derzeit noch nicht allgemein verfügbar sind.

Die zunehmend vorsichtigen Aussagen des IPCC zum BECCS sollten Grund genug sein, die Warnung des Science Advisory Council der Europäischen Akademien der Wissenschaften ernst zu nehmen, dass „BECCS mit substanziellen Risiken und Ungewissheiten verbunden bleibt, sowohl was die resultierenden Umweltbelastungen betrifft wie bezüglich der Fähigkeit, eine Netto-Entfernung von CO<sub>2</sub> 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).

### 2.3 Pyrolysekohle/Terra Preta/Biochar

Eine weitere Methode zur Speicherung von CO<sub>2</sub> Emissionen durch Biomassenutzung setzt auf die Pyrolyse, bei der eine Verkohlung unter Luftabschluss erfolgt (Köhlerei) und eine Pyrolysekohle entsteht (irreführend auch als „Biokohle“, bzw. vom IPCC als „Biochar“ bezeichnet), die dann in den Boden eingebracht werden soll. Mit Verweis auf die indigenen Praktiken im Amazonasbecken, die sog. „Terra Preta“, wird auch vorgeschlagen, diese Holzkohle im Ackerbau einzusetzen (Soentgen et al. 2017). Doch der durch indigene Völker vorgenommenen und für den Regenwald insgesamt minimalen Holzkohleeintrags kann nicht auf den Mega- und Gigatonnen-Maßstab übertragen 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).

Das IPCC verspricht sich dennoch von Pyrolysekohle eine Kohlenstoffspeicherung von bis zu 35 Gt CO<sub>2</sub>/Jahr sowie – als Nebenprodukt – eine Energieproduktion von bis zu 65 EJ/Jahr (IPCC 2018). Dabei bleiben bei den meisten Studien die erheblichen Energieverluste des Pyrolyseprozesses unberücksichtigt, denn ein erheblicher Teil des Energieinhaltes die Biomasse geht unvermeidlich als Umwandlungsverlust und Abwärme

verloren, wenn Holz mittels der Köhlerei in Pyrolysekohle umgewandelt wird.

Besonders lobt das IPCC WG 3 die erwarteten ökologischen Wirkungen: „CDR-Methoden wie die Bindung von Kohlenstoff im Boden und „Biochar“ können die Bodenqualität und die Kapazität zur Nahrungsmittelproduktion verbessern“ (IPCC 2022b: D.1.6), die Rückführung der Nährstoffe in die landwirtschaftlichen Flächen erleichtere es, die mit jeder Biomassegewinnung verbundenen Kohlenstoffverluste auszugleichen, die Bodenproduktivität und die Kohlenstoffbindung in Vegetation und Boden zu erhöhen, die Nährstoffnutzung zu verbessern und den Bedarf an chemischen Dünger zu verringern (Nabuurs et al. 2022). Zudem sei CO<sub>2</sub>, das als Kohlenstoff in „Biochar“ gespeichert ist, weniger anfällig für eine Wiederfreisetzung – was heißt, dass der Kohlenstoff nicht metabolisiert, d.h. nicht in den Bodenumus eingebaut wird (80% des in „Biochar“ gebundenen Kohlenstoffs verbleiben dauerhaft in der Pyrolysekohle), was wiederum zu den erwarteten Steigerungen der Bodenqualität wie erhöhte Bodenfruchtbarkeit, positive Effekte für den Bodennährstoffhaushalt und verringerte N<sub>2</sub>O Emissionen partiell im Widerspruch steht. Die teilweise belegten bodenverbessernden Eigenschaften von Pyrolysekohle sind darin begründet, dass die Kohlepartikel eine sehr große Oberfläche aufweisen und so 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.

Auf die potenziellen Risiken, insbesondere auf die Wissenslücken aufgrund der relativen Unausgereiftheit der Verwendung von „Biochar“ als Bodenverbesserungsmittel, und die unbekanntenen Folgen einer weit

verbreiteten Anwendung verweist der Bericht in einer Fußnote. Risiken negativer sozioökonomischer und ökologischer Folgen, unter anderem auf die biologische Vielfalt, sieht der Bericht nur dann, wenn Aufforstung oder der Anbau von Biomasse schlecht umgesetzt werden, z.B. wenn Landnutzungskonkurrenzen entstehen oder Monokulturen exotischer Pflanzen verwendet werden, und wenn die Biomasse nicht nachhaltig geerntet wird, was den Verlust von Waldkohlenstoff und Auswirkungen auf die biologische Vielfalt zur Folge haben kann (Nabuurs et al. 2022).

Nach Auffassung der IPCC WG III eignet sich die Pyrolyse gut für Materialien, die mit Pathogenen, Mikroplastik und Per- und Polyfluoralkylsubstanzen verunreinigt sein können, wie z.B. Schlachthof- und Kläranlagenabfälle, und beseitigt diese Risiken. Nicht erwähnt wird, dass die Pyrolyse – chemisch unvermeidlich – immer mit der Entstehung polyzyklischer Kohlenwasserstoffe (PAK) verbunden ist (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 lehnt der BUND schon aus Sicht einer nachhaltigen Stoffpolitik die Einbringung von unvermeidlich mit PAK kontaminierten Pyrolyse-Pflanzenkohle ab (BUND 2015; 2019).

## 2.4 Gesteinsverwitterung an Land

Die gezielte Gesteinsverwitterung an Land (englisch Enhanced Weathering, EW) wird schon länger als „wirksame und billige Methode der CO<sub>2</sub> Sequestrierung“ propagiert (Schuiling, Krijgsman 2006) und als vielversprechende, nachhaltige und technologisch einfache Methode beschrieben, obwohl ihre Wirksamkeit unter unterschiedlichen Boden- und Klimabedingungen noch weitgehend ungeklärt ist (Calabrese et al. 2022). Dazu soll fein zerkleinertes Silikatgestein auf land- und forstwirtschaftlichen Anbauflächen aufgebracht werden, um CO<sub>2</sub> zu binden. Obwohl die Forschung im Bereich der verstärkten Verwitterung

an Fahrt gewinnt, fehlt in der Literatur bisher eine Abschätzung der Umweltfolgen wie der Kosten des Gesamtprozesses, von der groß angelegten Produktion bis zur Ausbringung von fein zermahlenden Silikaten (und der oft mit ihnen assoziierten Schwermetalle). Die technische Machbarkeit wird untersucht, die Abschätzungen von Kostenverteilung und Wirksamkeit weisen noch große Wissenslücken auf, und eine Nachhaltigkeitsbewertung fehlt völlig. Erste Abschätzungen von Oppon et al. (2023) zeigen, dass die Industrieländer von der Anwendung dieser Technik ein relativ hohes Maß an positiven wirtschaftlichen Vorteilen haben und weniger negative Umweltauswirkungen innerhalb ihrer nationalen Grenzen erfahren können, da diese über Importe in Exportländer im globalen Süden ausgelagert werden würden. Unter ökonomischen, ökologischen und globalen Aspekten kann also von einer nachhaltigen Lösung nicht die Rede sein.

## 2.5 Exkurs: nicht-fossile Treibstoffe (Biofuels, synthetische Kraftstoffe)

Wir haben eingangs Geoengineering als einen Eingriff in das Klimasystem definiert, der das Ziel hat, die vom Menschen gemachte (anthropogene) Klimaerwärmung zu mildern. Diesem Ziel folgt auch die Entwicklung von alternativen, nicht fossil basierten Treibstoffen, allerdings nicht durch Eingriffe ins Klimasystem selbst, sondern durch Eingriffe in Technosysteme mit Auswirkungen auf Klimasysteme. Es handelt sich strenggenommen also nicht um Geoengineering, aber wegen der konkurrierenden Ansprüche an Biomasse und Anbauflächen für Agrofuels und BECCS behandeln wir das Thema an dieser Stelle.

Das Konzept der Biofuels (richtiger: Agrofuels) ist biomassebasiert. Nachwachsende Rohstoffe sollen als Alkohole (Methanol, Ethanol) Benzin, als Pflanzenöle Diesel und als Biogas Erdgas ersetzen. Dabei wird die Begrenztheit der verfügbaren Flächen zur Biomasseproduktion häufig übersehen (wie schon beim o.g. BECCS-Verfahren): 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 10,4% der globalen Nutzenergieversorgung, die 2019 aus Biomasse kamen, sind rund 40 Prozent der weltweiten „Nettoprimärproduktion“ (HANPP Human Appropriation of Net Primary Production, Haberl et al. 2004) (Nabuurs et al. 2022). Obwohl prozentual nahezu unverändert seit 2015, stieg die weltweite Biokraftstoffproduktion in absoluten Mengen um 25%, von 3,3 EJ/Jahr auf 4,0 EJ/Jahr (Nabuurs et al. 2022). 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). Insofern ist die Menge an nachhaltig verfügbarer Biomasse begrenzt. Diese sollte berechnet und dann priorisiert werden, für welche Zwecke sie eingesetzt werden soll. Stattdessen ging die Biomassestrategie der Bundesregierung vom Bedarf aus und befragte zu dessen Erhebung alle relevanten Branchen der Wirtschaft – ein Verfahren, das unvermeidlich zu weit überzogenen Bedarfszahlen, und wenn man diese als Planungsgrundlage nimmt, leicht zu ökologisch unverträglichen Nutzungskonzepten führt. Auch die IPCC WG 3 geht von dem Bedarf aus (nicht nur für Biomasse), der sich daraus ergibt, dass „CO<sub>2</sub>-Minderungstechnologien für die Luft- und Schifffahrt benötigt werden. In der Luftfahrt gehören Biokraftstoffe mit hoher Energiedichte [...] zu solchen Technologien. Alternative Kraftstoffe für die Schifffahrt umfassen emissionsarmen Wasserstoff, Ammoniak, Biokraftstoffe und andere synthetische Kraftstoffe“ (IPCC 2022b: C.8.4). Das erfordert jedoch noch Verbesserungen der Produktionsprozesse und Kostensenkungen. Minderungsvorteile im Verkehr an Land werden vor allem im Bereich Schwerlastverkehr erwartet; dieselben Technologien könnten die Dekarbonisierung des Schienenverkehrs unterstützen (IPCC 2022b: 2.4). Dekarbonisierungsoptionen für die Schifffahrt und den Luftverkehr erforderten noch Forschung und Entwicklung, obwohl sich fortschrittliche Biokraftstoffe als eine praktikable Option abzeichneten, so die IPCC WG 3.

Letztlich wäre der Großteil der Energienutzungen mit Strom aus Wind und Sonne sowie Sonnenwärme abzudecken und dies mit deutlich geringerem Flächenbedarf. Netto-Null-CO<sub>2</sub>-Emissionen im Industriesektor hält die IPCC WG 3 für möglich, sieht sie aber als Herausforderung. Zu den primären Optionen gehört die Umstellung der Produktion auf neue Prozesse, die THG-arme Energieträger und Rohstoffe (z. B. Elektrizität, Wasserstoff, Biokraftstoffe) verwenden. Leichtindustrie und verarbeitendes Gewerbe können durch die Umstellung auf THG-arme Kraftstoffe (z. B. Biokraftstoffe und Wasserstoff) und Elektrizität (z. B. für elektrothermische Heizungen und Wärmepumpen) weitgehend dekarbonisiert werden (Nabuurs et al. 2022: S. 5.5).

Ein größerer Ausbau der Bioenergieproduktion erfordert die Herstellung weiterentwickelter Biokraftstoffe im großen Maßstab. Jedoch ist die notwendige Technologie für die großtechnische Produktion noch nicht wettbewerbsfähig und erfordert erhebliche Durchbrüche oder Marktänderungen, um das zu werden. Zudem sind die bio-basierten Verfahren energetisch ineffizient: die Verarbeitung (Trocknung, Entwässerung, Pelletierung) verschiedener Rohstoffe zur Erzeugung von Strom aus Biomasse ist energieintensiv, und bei der Nutzung aktueller Kraftwerke liegt der Wirkungsgrad bei etwa 22 %. Auch mit fortschrittlichen Technologien steigt er nur auf bis zu 28 %. Solche Bioökonomie-Raffinerien der „zweiten und dritten Generation“ werden die genannten Probleme also nicht lösen, sondern sie eher verschärfen (Kuchler 2014; Spangenberg, Settele 2009b; Giampietro, Mayumi 2012).

Schließlich wirft der Anbau spezieller Bioenergiepflanzen eine ganze Reihe von Nachhaltigkeitsfragen auf, darunter die Konkurrenz mit Flächen für die Nahrungsmittelproduktion und die Forstwirtschaft, für Grundwasserneubildung und Wassernutzung, die Auswirkungen auf Ökosysteme und Landnutzungsänderungen und deren Folgen für die Biodiversität. Diese Faktoren, und nicht die geophysikalischen Eigenschaften

ten, bestimmen weitgehend das Potenzial für Bioenergie und erklären die unterschiedlichen Potenzialschätzungen in der Literatur. Ihre langfristige Rolle in kohlenstoffarmen Energiesystemen ist daher ungewiss (Nabuurs et al. 2022: 6.4.2.6). Insofern sind auch die jüngsten Schätzungen des technischen Bioenergiepotenzials – unter Berücksichtigung von Lebensmittelsicherheit und Umweltaspekten – im Bereich von 5–50 bzw. 50–250 EJ pro Jahr bis 2050 für Reststoffe und spezielle Biomasseproduktionssysteme mit Vorsicht zu betrachten (Pathak et al. 2022: TS.5.6.1).

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 kontraproduktiv ist dabei die EU-Förderung von Energie-Mais auf ehemaligen Moorböden, der diese Böden zu potenten CO<sub>2</sub>-Emittenten macht, während sie bei extensiver Nutzung und Wiedervernässung wirksame Kohlendioxid-Senken sein könnten (Ziegler 2020; siehe auch Kapitel 4). Die Konkurrenz der Biomasse- 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 Treib-

hausgaseffekte durch N<sub>2</sub>O-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 Pflanzenverwendungen lukrativer erscheinen und ein Teil der Schäden noch reversibel ist, trifft das bei der Errichtung großer Biomasse-Raffinerien nicht mehr zu. 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. 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 (Spangenberg et al. 2014). Werden die Bäume vollständig genutzt, leidet die Nährstoffbilanz und damit die Bodenfruchtbarkeit (Englisch 2007; Flückinger, Braun 2009).

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 (Produktionsstart Ende 2022) auf eine Kapazität von 200.000 t/a ausgelegt, aus Laubholz werden Monoethylenglykol, Monopropylenglykol und Industriezucker hergestellt. Anwendungsfelder für Bio-Monoethylenglykol sind

unter anderem Textilien, PET-Flaschen, Verpackungen und Enteisungsmittel. Bio-Monopropylenglykol wird beispielsweise in Verbundwerkstoffen, Arzneimitteln, Kosmetika und Waschmitteln eingesetzt.

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, waren Algen, insbesondere Mikroalgen, die in wassergefüllten Behältern unter Nutzung der Sonnenenergie Photosynthese betreiben und Biomasse erzeugen. Da sie damit keine Ackerflächen beanspruchen waren 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 hat getrogen – den Versuch, Biotreibstoffe aus Algen herzustellen, hat mit ExxonMobil inzwischen auch der letzte Ölmulti aufgegeben (Werstervelt 2023). Das kam nicht wirklich überraschend – um die versprochene hohe Produktionsleistung zu erzielen brauchen die Algen hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, und diese müsste entweder aus der Luft aufkonzentriert werden (zur Energiebilanz von BACCS s.o.), oder es würden stark CO<sub>2</sub>-haltige Abgase von fossil befeuerten Kraftwerken genutzt – die aber auslaufen sollen. In weiteren prozessspezifischen und energieaufwändigen Schritten müssten die Algen dann aus dem Wasser extrahiert und getrocknet werden. Erst dann folgen die (für Biomassenutzung üblichen und ebenfalls energieaufwändigen) Schritte, die notwendig sind, um die Biomasse in Methanol und andere Energieträger umzuwandeln. Energiebilanz, Wirkungs- und Umset-

zungseffizienzen waren ernüchternd, und auch die gentechnische Modifikation der Algen hat nicht zu den gewünschten Ergebnissen geführt (Werstervelt 2023). Unter Einbeziehung aller Faktoren fand A. Weiss (2016), ebenfalls am Institut für Technikfolgenabschätzung ITAS des KIT in Karlsruhe, dass im Gesamtprozess der Nettoenergieaufwand für Anlagen, Pumpenergie, Belüftung, Düngung usw. im optimalen Fall bei 1,8:1 lag, d.h. dass in dem „Produktionsprozess“ pro eingesetzte 1,8 Einheiten Energie nur 1 Einheit Energie generiert wurde (in der Realität lag der Aufwand eher bei 3-4:1). Algensprit ist deshalb heute und für die nächsten Jahrzehnte nicht praktikabel und wäre eher ein „Energievernichter“ als ein Klimaretter und ist – wie alle synthetischen Kraftstoffe – keine Alternative zum Ausstieg aus der Technik der kohlenwasserstoff-basierten Verbrennungsmotoren. Sonnenenergie kann weitaus effizienter zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt werden und Kraftstoffe in begrenzten Mengen eher als Biogas aus Biomasseabfällen gewonnen werden.

## 2.6 Fazit

**Weder zeitlich noch mengenmäßig können „negative Emissionen“ Anstrengungen zur Emissionsreduzierung ersetzen. Erst wenn der Gesamtenergieverbrauch halbiert und die daraus verbleibenden Treibhausgasemissionen bis auf einen absolut unvermeidbaren Rest reduziert sind, könnten sie eine Rolle spielen.**

**Alle beschriebenen Techniken zur Erzeugung von negativen Emissionen sind zudem für die großflächige Anwendung ungetestet, hoch energieintensiv, und mit ökologischen Folgeschäden verbunden. Deren Größe und Eintrittswahrscheinlichkeit kann bisher nicht wissenschaftlich abgesichert erfasst werden, ist aber potenziell verheerend für Biodiversität, Ökosysteme und ihre Leistungen.**

**Die Notwendigkeit von Techniken, die Kohlendioxid aus der Atmosphäre entnehmen, ergibt sich insbesondere, wenn man einen Overshoot, also eine**

Erderhitzung von mehr als 1,5 °C für einige Zeit zulässt und durch CCS und andere Technologien für negative Emissionen den Temperaturanstieg in einem Dreivierteljahrhundert wieder auf den Zielwert senken will. Solche Zielprojektionen sind abzulehnen, denn jedes Zehntelgrad verstärkt die Schäden deutlich, und macht einige davon unumkehrbar. Zudem sind Schocks, Kipppunkte und –kaskaden zwar im Text des 6. IPCC Berichts von WG 2 beschrieben, aber nicht modelliert worden, sodass ihre erhöhte Wahrscheinlichkeit beim Überschreiten von 1,5 °C keinen Einfluss auf die von WG 3 genutzten Szenarien hatte (DE-IPCC 2022a).

Szenarien mit Overshoot sind als Entscheidungsgrundlage der Politik daher ungeeignet.

# 3. Geoengineering II: Radiation Management

Unter Solar Radiation Management (SRM) oder Solar Geoengineering können Strategien zusammengefasst werden, die darauf abzielen, den Strahlungsenergiehaushalt der Erde direkt zu verändern, mit dem Ziel, die Erwärmung zu reduzieren und einen Kühleffekt zu generieren (IPCC 2014; Lawrence et al. 2018; Bellamy et al. 2013). SRM will also nicht die Ursachen bekämpfen, sondern zielt auf die Reduzierung eines der Symptome, nämlich die Erhöhung der Durchschnittstemperatur. Lokale Klimaänderungen bleiben dabei meist ebenso unberücksichtigt wie andere Folgen der steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, z. B. die Versauerung der Weltmeere und die Änderung des Wachstumsverhaltens von Pflanzen.

Der Ansatz als solcher ist nicht neu – Wetteroptimierung durch technische Eingriffe wird seit dem 19. Jahrhundert diskutiert und (allerding mit wenig Erfolg) erprobt; erste Vorschläge zur Bekämpfung des Klimawandels durch das, was wir heute Geoengineering nennen, und insbesondere SRM wurden in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts veröffentlicht (Wiertz 2010). bzw. nehmen zu, wenn SRM-Maßnahmen die Anstrengungen zur Emissionsreduktion dämpfen. Dennoch finden die Konzepte Beachtung; Baum et al. (2022) bezeichnen sie als interessant und weisen darauf hin, dass sie den Vorteil bieten, dass schwierige Kompromisse und Entscheidungen in Bezug auf die Nutzung von Land und Ressourcen auf der Erde vermieden werden.

Solar Radiation Management (SRM) oder Solar Geoengineering Strategien können in weltraumbasierte, atmosphärische und oberflächenbasierte Methoden unterteilt werden (Lawrence et al. 2018). Insbesondere in den USA findet SRM starke Unterstützer in Politik (auch im President's Council of Advisers on Science and Technology der Biden-Administration) und Wissenschaft. So ging der Report der National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021) davon aus, dass die notwendige Dekarbonisierung nicht früh genug geschafft wird, um massive Klimaschäden zu verhindern und begründete damit die

Forderung nach einem 200 Millionen US\$ SRM Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die nächsten fünf Jahre. SRM-Strategien sollen „effektiv, global, schnell, reversibel und kostengünstig“ (Reynolds 2019) das globale Temperaturniveau senken (Bahn et al. 2015; Barrett 2008; Preston 2013; Reynolds 2019). Schon diese Definition zeigt einige der mit ihnen verbundenen Probleme: effektiv nur für ein (wesentliches) Teilproblem, global mit dem Risiko regionaler atmosphärischer Störungen, reversibel nur dann, wenn der Treibhausgasgehalt der Atmosphäre wieder auf Gegenwartsniveau oder darunter zurückgeführt ist – ohne aktive Entfernung oder Fixierung in der Biosphäre verbleibt Kohlendioxid 10.000 Jahre oder länger in der Atmosphäre. So lange müssten die Maßnahmen aufrechterhalten werden, da eine Rücknahme sonst einen terminalen Schock bedeuten könnte. Die damit verbundenen „Ewigkeitslasten“ werden unterschlagen, wenn SRM als kostengünstig dargestellt wird. Dennoch fordern einige Wissenschaftler\*innen, zukünftig mehr in Forschungsprojekte zu den jeweiligen SRM-Optionen zu investieren, um die angesprochenen Risiken besser minimieren zu können (Jones et al., 2018; Lawrence et al., 2018; Pasztor et al., 2017; Robock, 2015). Richtig ist, dass wenn SRM Techniken heute verfügbar wären, diese die globale Erwärmung schneller stoppen oder zumindest verzögern könnte als z.B. Aufforstung oder die Wiederherstellung degradierter Wald- und Feuchtgebietsökosysteme, mit prognostizierten Effekten in der Spanne eines Jahrhunderts (IPCC 2022b, 2014; 2007). Das ist aber nicht der Fall.

## 3.1 Weltraumbasierte Ansätze

Die ersten Ideen die Erderwärmung durch weltraumbasierte Methoden zu manipulieren, stammen aus der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts. Schon in den 1960er Jahren veröffentlichten die russischen Autor\*innen N.P. Rusin und L.A. Flit den Vorschlag, durch einen Ring aus Metallteilchen um die Erde, dem Saturn nachempfunden, Sonnenlicht in höhere Breiten zu streuen (und damit für gemäßigte Temperaturen in Sibirien zu sorgen) (Wiertz 2010).

Der Vorschlag von Early aus dem Jahr 1989 zielte auf eine Begrenzung der Erderwärmung und sah vor, um die Erde eine dünne Glasschicht zu installieren, wobei das Material hierzu vom Mond stammen sollte (Early 1989) – eine Idee die Bromley et al. (2023) mit ihrem Vorschlag wieder aufgegriffen haben, soviel Mondstaub abzubauen und in den Weltraum zu schießen, dass zwischen Sonne und Erde eine 10-Milliarden-Kilogramm-Staubwolke im Weltraum entstünde, die für Menschen auf der Erde unsichtbar jedes Jahr das Äquivalent von etwa sechs Tagen Sonnenlicht auf der Erde blockieren würde. Da der Staub innerhalb einer Woche vom Sonnenwind aus seiner Position verdrängt würde, müsste er regelmäßig erneuert werden. Aufbauend auf Early (1989) entwickelte Roger Angel ein Konzept, eine ca. 20 Millionen Tonnen schwere Wolke aus transparentem und reflektierendem Material in 2,5 Millionen Kilometern Entfernung zur Erde, nahe des inneren Lagrange-Punkts zu errichten, wo sich die Schwerkraft beider Himmelskörper aufheben, sodass mit diesem „Weltraum-Sonnenschirm“ 1,8% des Sonnenflusses zwischen Sonne und Erde blockiert würde (Angel 2006). Auch diese Idee wird weiterverfolgt: Forscher\*innen des Massachusetts Institute of Technology haben 2022 ein „Sonnen schild“ konzipiert, das aus einem riesigen „Floß“ aus gefrorenen Blasen von der Größe Brasiliens besteht (<https://senseable.mit.edu/space-bubbles/>). Weitere Ansätze zielen darauf ab, Weltraumspiegel in der Umlaufbahn zwischen Erde und Sonne zu installieren, um die Sonnenstrahlung daran zu hindern, die Erdoberfläche zu erreichen (Mautner 1990). All diese Methoden haben sich jedoch insgesamt als bislang kaum realisierbar herausgestellt. Entsprechende Vorhaben könnten nur umgesetzt werden, wenn erstens die Kosten drastisch gesenkt und zweitens große Fortschritte in der jeweiligen Technologie selbst erzielt werden würden.

## **3.2 Erhöhung der Wolkenalbedo**

### **3.2.1 Marine Wolkenaufhellung (Marine cloud brightening, MCB)**

Die marine Wolkenaufhellung zielt darauf ab, Meersalzpartikel in die Wolkenschicht zu sprühen, um damit tief liegende Stratokumuluswolken – insbesondere in tropischen Regionen – zu verdicken und aufzuhellen. Die Meersalzpartikel würden als Kondensationskerne fungieren und die Anzahl der Tröpfchen in der Wolke erhöhen, sodass die Reflexion kurzweiliger Strahlungsflüsse in den Weltraum erhöht würde (Horowitz et al. 2018; Latham et al. 2012; Salter et al. 2008). Weitere Forschungsergebnisse zeigen, dass selbst bei klarem Himmel die Reflexion durch Gischt verstärkt werden kann (Ahlm et al. 2017; Alterskjær et al. 2013). Die Idee der marinen Wolkenaufhellung geht ursprünglich auf Latham (1990) zurück, der insbesondere die Wiederherstellung des polaren Eisschildes und die Verringerung des Bleichens von Korallenriffen zum Ziel hatte (Latham et al. 2012; Parkes et al. 2015; 2012). Jedoch sind die erzielbaren Klimaeffekte schwer bestimmbar. Jones et al. (2009) schätzen in diesem Zusammenhang, dass durch eine großflächige Veränderung der Stratokumuluswolken über dem nördlichen und südlichen Pazifik sowie über dem Südatlantik bis zu 35% der kurzweiligen Strahlung in den Weltraum zurückreflektiert und die thermischen Folgen des Klimawandels damit um bis zu 25 Jahre verschoben werden könnten (Jones et al. 2009; Wang et al. 2011). Dabei sei eine Veränderung der Wolken über dem Südpazifik am effektivsten (Jones et al. 2009). Baughman et al. (2012) berechneten jedoch, dass die sommerlichen Ablationsraten in der Arktis gar nicht verlangsamt würden und vor allem im westlichen Pazifik größere Änderungen der Niederschlags- und atmosphärischen Zirkulationsmuster erwartbar seien (Williamson, Bodle 2016).

Die potenzielle Abkühlung scheint weitgehend von der Größe und Menge der eingebrachten Partikel abzuhängen; das Einbringen von zu wenig oder zu vielen Partikeln könnte dabei sogar zu negativen

Klimaeffekten führen (Alterskjær et al. 2013; Stjern et al. 2018). Zusätzlich sind die komplexen Aerosol-Wolken-Wechselwirkung und die hiermit einhergehende hohe Puffereigenschaft der Wolken gegen Veränderungen durch Aerosole insgesamt noch nicht ausreichend erforscht und erschweren die Vorhersage der potenziell erreichbaren Klimaeffekte zusätzlich (Lawrence et al. 2018; Malavelle et al. 2017; Stjern et al. 2018). Zudem betrachten die genannten Studien nur die Strahlungseffekte, nicht aber die direkte Interaktion der Treibhausgase mit den Wolken. So zeigen Simulationen, dass Stratokumuluswolken unter dem Einfluss von CO<sub>2</sub> auch ohne Temperatureffekte ausdünnen und längerfristig verschwinden könnten, mit der Folge einer starken und wohl irreversiblen Erwärmung (Schneider et al. 2020). Die Autoren schließen aus ihren Berechnungen, dass eine Reduzierung der Sonneneinstrahlung keine sichere Methode sei, eine weitere Erderwärmung zu verhindern.

Neben unvorhersehbaren Klimaeffekten sind auch weitere, teils gravierende, negative Auswirkungen auf die aquatische und terrestrische Umwelt nicht auszuschließen. Global veränderte Wasserkreisläufe sind einer der wichtigsten erwartbaren negativen Effekte (Alterskjær et al. 2013; Horowitz et al. 2018; Jones et al. 2011; Latham et al. 2012): Zum einen wird ein global verringerter durchschnittlicher Niederschlag vorhergesagt, der nachteilige Auswirkungen auf das Vegetationswachstum hat (Jones et al. 2013; Stjern et al. 2018). Dies könnte insbesondere in den Tropen – wie im Amazonasbecken – die terrestrische Primärproduktivität deutlich reduzieren (Alterskjær et al. 2013; Jones et al. 2013). Andererseits könnten regional Niederschläge zunehmen, vor allem in den niederen Breiten, und hier zu Überschwemmungen führen (Alterskjær et al. 2013). Ein zweiter erwartbarer, negativer Effekt manifestiert sich immer dann, wenn die „geimpften“ Wolken nicht über dem Meer, sondern über Land abregnen: das könnte die terrestrische Vegetation (mit Ausnahme der salzangepassten Küstenvegetation), aber auch Süßwasser-Ökosysteme wie Bäche und Seen schwer schädigen.

Abgesehen davon ist die großtechnische Umsetzbarkeit der Technologie zumindest fraglich. Insbesondere die Entwicklung von autonomen Schiffen oder Plattformen, die dauerhaft und dabei bestenfalls unabhängig von fossilen Brennstoffen betrieben werden können und zudem auch bei extremen Wetterereignissen noch zuverlässig sind (die Wolkenaufhellung müsste kontinuierlich fortgesetzt werden, da schon bei kurzen Unterbrechungen die Temperaturerhöhung wieder einsetzt, ggf. verstärkt durch einen angestiegenen CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre), ist eine große und bisher nicht umsetzbare Herausforderung (Latham et al. 2012).

### **3.2.2 Ausdünnung von Zirruswolken (Cirrus Cloud Thinning, CCT)**

Der erhoffte Klimaeffekt durch die Ausdünnung von aus Eiskristallen bestehenden Zirruswolken basiert auf der Tatsache, dass Zirruswolken in großer Höhe einen Nettoerwärmungseffekt erzeugen, weil sie langwellige terrestrische Strahlung zurückhalten und nicht in den Weltraum entweichen lassen (Lohmann, Gasparini 2017). CCT zielt darauf ab, diesen Erwärmungseffekt durch ein Ausdünnen der Wolken zu reduzieren. Durch das Einbringen von eiskernbildenden Partikeln (z.B. Wismut(III)-iodid) oder anderen Aerosolen (Schwefel oder Salpetersäure) in die Wolken sollen insgesamt größere Eiskerne in diesen wachsen. Wenn die Eiskerne eine bestimmte Größe erreichen, sedimentieren sie aus den Wolken heraus und reduzieren somit ihre Dicke und Lebensdauer (Lawrence et al. 2018; Mitchell, Finnegan 2009). Das so genannte Impfen (im Englischen seeding) der Wolken ist über Flugzeuge oder autonome Drohnen vorgesehen. Potenzielle Abkühlungseffekte werden als direktere Auswirkungen auf eine bestimmte Region vorhergesagt, hängen jedoch von der geographischen Verbreitung der Zirruswolken ab und schließen tropische Regionen mit so genannten Amboss-Zirruswolken aus (Jackson et al. 2016; Lohmann, Gasparini 2017; Muri et al. 2014; Storelvmo, Herger 2014). Insgesamt sind jedoch die regional erzielbaren Abkühlungseffekte wiederum sehr unsicher und erwartbare negative Effekte der Technologie können auch andere Regionen

betreffen. Dies liegt u.a. daran, dass die Parameter der Nukleation des Eises und die Effektivität der injizierten Partikel in potenziell inhomogenen und chemisch variablen Zirruswolken bisher auch in mittleren und hohen Breiten noch weitgehend unbekannt sind (Cziczo et al. 2013; Kärcher 2017; Lohmann Gasparini 2017). Wie bei der Aufhellung der Stratokumuluswolken könnte auch beim Ausdünnen von Zirruswolken ein „Overseeding“ sogar einen gegenteiligen Effekt erzeugen und zu einer globalen Nettoerwärmung führen, wobei der diesbezügliche Schwellenwert für Menge und Ausbringung der Eiskerne noch unbekannt ist (Gasparini, Lohmann 2016; Lohmann, Gasparini 2017). Würde dieser Wert jedoch überschritten, so würde dies zu einer starken Verdichtung der Zirruswolken führen, mit Klimaeffekten, die mit der doppelten Menge an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre vergleichbar sind (Geoengineering Monitor 2021b; Kristjánsson et al. 2015). Schließlich kann auch das Auftreten teils negativer Effekte in Bezug auf regionale und saisonale Niederschlagsmuster nicht ausgeschlossen werden (Kärcher 2017; Lawrence et al. 2018). Niederschläge in der Sahelzone könnten sich beispielsweise erhöhen und der indische Monsun könnte verstärkt werden (Gasparini et al. 2020; Kristjánsson et al. 2015). Regierungen könnten zudem versuchen, Hitzewellen über ihrem eigenen Staatsgebiet abzumildern und würden damit gleichzeitig andere Regionen negativ beeinflussen (Abatayo et al. 2020) und bspw. dort für Überschwemmungen sorgen (Gasparini, Lohmann 2016). Weitere potenzielle Nebenwirkungen aufgrund der zum Impfen verwandten Materialien können zudem nicht ausgeschlossen werden und sind noch nicht ausreichend erforscht (Gasparini et al. 2020; Kristjánsson et al. 2015).

### **3.3 Stratosphärische Aerosolinjektion (Stratospheric Aerosol Injection, SAI)**

Die stratosphärische Aerosolinjektion (SAI) wird auch als „sunshade geoengineering“ bezeichnet (Irvine et al. 2016). Sie zielt darauf ab, die Albedo der Erdatmosphäre insgesamt durch die Injektion von Aerosolen wie Schwefeldioxid in die Stratosphäre durch Flugzeuge in großer Höhe oder Fesselballons zu erhöhen

(Lawrence et al. 2018). Das gasförmige Schwefeldioxid oxidiert zu lichtstreuendem Sulfat und erzeugt so Wolken, welche wie beim Ausbruch eines Vulkans mehr Sonnenstrahlung zurück ins All reflektieren (Davidson et al. 2012; Jones et al. 2018; Kravitz et al. 2011). Verschiedenen Modellierungsergebnissen zur Folge kann auf diese Art die durchschnittliche oberflächennahe Temperatur nahe dem vorindustriellen Niveau wiederhergestellt werden, insbesondere in Kombination mit weiteren CDR-Methoden (Ito, 2017; Kravitz et al., 2017, 2013; MacMartin et al., 2019; Yu et al., 2015). Die Abkühlung wäre jedoch nicht gleichmäßig – die Tropen würden stärker abgekühlt als die Polargebiete, weil das Sonnenlicht über den Tropen stärker ist als über den Polargebieten und mehr davon reflektiert würde. Wenn Abermillionen Tonnen Schwefeldioxid durch Raketen, Ballons oder Flugzeuge in die höhere Atmosphäre eingebracht würden, um z.B. Europa auf seine vorindustrielle Temperatur abzukühlen, dann wäre es in den Polgebieten immer noch deutlich wärmer als im gleichen Referenzzeitraum und in den Tropen wäre es kühler. Das kann für den tropischen Regenwald genauso verheerend sein wie eine Erwärmung.

Schwefeldioxid hat zudem eine potenziell ozonschädigende Wirkung und ein Wissenschaftskonsortium aus WMO (World Meteorological Organization), dem United Nations Environment Programme Ozone Secretariat, den US National Oceanic and Atmospheric and National Aeronautics and Space Administrationen und der European Commission (DG RES) warnen jedoch, dass unbeabsichtigte Folgen von SAI „auch die Temperaturen in der Stratosphäre, die Zirkulation und die Ozonproduktions- und -zerstörungsraten sowie den Ozontransport beeinflussen könnten“ (WMO 2022). Die Sulfatpartikel würden sich zudem nach einer relativ geringen atmosphärischen Verweildauer auf der Erdoberfläche niederschlagen, wo sie zur weiteren Versauerung von Böden und Meeren beitragen würden. Deshalb wollen andere SAI-Vorschläge das SO<sub>2</sub> durch die Injektion anderer Nanopartikel ersetzen bzw. ergänzen; ein Forschungsprogramm der Harvard Universität arbeitet an Designer-Aerosolen. Ein Ansatz

aus dem Jahr 2010 zielte darauf ab, schwebende Nanopartikelscheiben aus Aluminium, Aluminiumoxid und Bariumtitanat in die obere Stratosphäre bzw. die Mesosphäre einzubringen, sodass mehr Sonnenlicht zurück in die Atmosphäre reflektiert würde bis die UV-Strahlung die Nanopartikelscheiben schließlich zersetzt (Keith 2010) und sich die Nanopartikel dann früher oder später auf der Erdoberfläche niederschlagen, mit bisher unbekanntem Umwelt- und Gesundheitsfolgen. Der Ansatz wird in der Forschungspraxis zurzeit nicht weiterverfolgt. Keith (2016) schlägt jedoch weiterhin vor, Calcit oder Kalksteinpartikel als Ergänzung in die Stratosphäre zu injizieren, sodass Säuren aus anthropogenen Emissionen neutralisiert werden, welche das stratosphärische Ozon zersetzen (Keith et al. 2016). In Modellen sowie einem geplanten Forschungsversuch mit Fesselballons im nördlichen Schweden wird daher nunmehr das Injizieren von Calcit-Puder oder Sulfat in die Stratosphäre getestet (Golja et al. 2021; Greenfield, Patrick 2021).

Durch die erzielte Abdunkelung der Atmosphäre können jedoch negative Auswirkungen auf die terrestrische und marine Photosyntheseleistung nicht ausgeschlossen werden, sodass der gesamte Naturhaushalt in Mitleidenschaft gezogen würde (Crutzen 2006; Jones et al. 2018). Daneben sind der bereits benannte polare Ozonabbau und erneut regionale Temperaturungleichgewichte, wie eine Temperaturabnahme in den Tropen und ein Anstieg an den Polen (Moore et al. 2014; Tilmes et al. 2016) zu erwarten, und damit eine Abnahme der von den Temperaturdifferenzen angetriebenen globalen Luftzirkulation. Im Zusammenhang damit droht dann ein verminderter globaler Niederschlag sowie die Störung des asiatischen und afrikanischen Sommermonsuns als weitere mögliche negative Auswirkungen von SAI (Biermann, Möller 2019; Ferraro, Griffiths 2016; Kravitz et al. 2013, 2009; Rasch et al., 2008; Robock, 2008; Stanhill and Cohen, 2001; Vaughan and Lenton, 2011; Yu et al. 2015).

Nicht nur die Risiken, auch die Erfolgsaussichten solcher Maßnahmen sind ungewiss. So vermuten Hong

et al. (2017), dass bereits die gestörte atlantische meridionale Umwälzzirkulation einer möglichen Abkühlung durch SAI-Maßnahmen deutlich entgegenwirken könnte und diese letztlich sogar aufheben könnte. Bahn et al. (2015) legen zudem dar, dass die Abkühlungseffekte eher gering bleiben werden und lediglich in Modellen künstlich konstruiert sind. Dennoch gibt es bereits wirtschaftliche Interessent\*innen. So ließ das Start-up-Unternehmen Make Sunsets im April 2022 Ballons in die Stratosphäre steigen, um Schwefeldioxid freizusetzen und die Atmosphäre reflektierender zu machen. Die Freisetzung war kommerziell motiviert, mit dem Ziel, bei nach Quellen für „carbon credits“ suchenden Firmen Aufmerksamkeit für die Technik zu erregen und „Abkühlungsgutschriften“ für künftige Ballonflüge zu verkaufen, und wurde nicht öffentlich bekannt, bis MIT Technology Review im Dezember einen Artikel darüber veröffentlichte (Temple 2022).

Die Zweifel am langfristig erzielbaren Klimaeffekt gründen sich unter anderem darauf, dass in der Atmosphäre Aerosole eine viel geringere Lebensdauer als Treibhausgase besitzen. Die Dauer und Intensität der notwendigen Aerosoleinbringung, um einen bestimmten (dauerhaften) Klimaeffekt zu erzielen, ist mithin schwierig zu bestimmen. Bei einem plötzlichen Beenden der Injektion von Aerosolen wird daher ein teils starker Anstieg der globalen Temperaturen erwartet. Gleiches gilt, wenn die Injektion von Aerosolen nicht mehr mit der gleichen Intensität fortgesetzt werden kann (Brasseur, Roeckner 2005; Jones et al. 2013; Trisos et al. 2018). Rabitz (2019) entwickelte daraufhin Szenarien, welche bei einer plötzlichen Beendigung der Injektion größere Schäden vermeidet. Die Modellierung erfolgte allerdings nur unter Berücksichtigung weniger Variablen und unter der optimistischen Annahme, dass entweder die multilaterale Zusammenarbeit oder die Wirtschaftskraft der Staaten intakt bleibt (Rabitz 2019).

Um negative Auswirkungen zu vermeiden, schlägt die SAI-Forschung zusätzliche Maßnahmen wie mehrere Injektionsorte, saisonale Injektionen, eine Variation

der Höhe und des Breitengrads der Injektionen zur Risikominimierung vor (Jones et al. 2017; Keith et al. 2016; MacMartin et al. 2017; Vioni et al. 2019). Dennoch sind selbst diese mehrschichtigen Modelle mit Unsicherheiten behaftet und nicht in der Lage, die hochkomplexen natürlichen Wechselwirkungen exakt abzubilden (Wieding et al. 2020; Yu et al. 2015). Es bleibt somit weiterhin unklar, ob alle Risiken verbesserter SAI-Techniken wirklich bekannt sind und abgeschätzt werden können. Nicht zuletzt ist auch die großtechnische Umsetzung der stratosphärischen Aerosolinjektion noch nicht ausreichend abgesichert und die Kosten hierfür dürften viel höher sein als ursprünglich angenommen (Moriyama et al. 2017; Smith, Wagner 2018).

### **3.4 Erhöhung der Oberflächenalbedo**

Dieses SRM-Verfahren zielt darauf ab, mehr Sonnenlicht in den Weltraum zurück zu reflektieren und auf diese Art die Erderwärmung zu senken. Auch dieser Denkansatz ist nicht neu – ein Bericht von 1965 an den damaligen US-Präsidenten Lyndon B. Johnson griff wissenschaftliche Befürchtungen einer globalen Erwärmung auf und diskutierte ausschließlich technologische Gegenmaßnahmen: Reflektierende Partikel, die auf der Meeresoberfläche schwimmen, könnten demnach Sonnenlicht abschirmen und einen Temperaturanstieg verhindern (Wiertz 2010). Heute werden der Anbau von stärker reflektierenden Nutzpflanzen, die Rodung borealer Wälder, um schneebedeckte Gebiete zu erhöhen oder aber die Abdeckung großer Wüsten oder Eisflächen mit stark reflektierenden Materialien, ebenso wie das Aufhellen von Berggipfeln oder aber das weiße Anstreichen von Dächern in Betracht gezogen, wie im Folgenden näher dargestellt wird. Auch wenn diese Methodik im Vergleich zu weiteren SRM-Verfahren in aller Regel ein geringeres Risiko in der Ausführung birgt als andere SRM-Verfahren und teilweise – wie im Fall der Direktsaat – lediglich regional wirkt (Seneviratne et al., 2018), bestehen gleichzeitig diverse Zielkonflikte, was sich insbesondere im Fall einer anvisierten großflächigen Rodung in der borealen Zone widerspiegelt.

#### **3.4.1 Bedeckung von Eisoberflächen und die Abdeckung von Gletschern sowie Wüsten**

Im Fall der Abdeckung von Eisoberflächen soll das arktische Eis mit strahlungsabweisendem Material aus Quarzglas oder Polypropylen überzogen werden, um die darunter liegenden Gletscher und Schneedecken zu isolieren (Geoengineering Monitor 2021a). Eine Studie von Field et. al (2018) berechnet durch den großflächigen Einsatz von Quarzglas lokale Temperaturminderungen in der Arktis um mehr als 1,5 °C und in der Region um die Barentssee um bis zu 3 °C. Zudem ist eine Zunahme des arktischen Meereseises um 20 bis 50 cm vorhergesagt worden (Field et al. 2018). Schutzmatten aus Polypropylen wurden bereits zum Schutz von Skigebieten in den Alpen eingesetzt. Die Herstellung des Materials, basierend auf Rohöl, ist jedoch sehr energie- und kostenaufwändig (4,6 Mio. USD für einen Quadratkilometer Gletschereis) und verursacht folglich zur Bekämpfung des Klimawandels kontraproduktive Treibhausgas-Emissionen im großen Umfang (Geoengineering Monitor 2021a). Zudem handelt es sich lediglich um lokal erzielbare Abkühlungseffekte, welche bei einer weiter steigenden Erderwärmung immer schwieriger zu erreichen sind. Darüber hinaus ist in der Folge einer Abdeckung von Eisschichten durch reflektierendes Material die Nutzung dieser Flächen beispielsweise durch die lokal vorkommende Tierwelt nicht mehr möglich. Im Fall der Zerstörung der Bedeckungen oder ihrer Beschädigung und anschließenden Verwehung droht zudem die Verschmutzung der Arktis und der Meeresumwelt, mit (Mikro)Plastik im Fall der Nutzung von Polypropylen oder durch Quarzstaub bei der Nutzung von Quarzglas. Beim Einatmen von Quarzstaub sind zudem negative Auswirkungen auf den Menschen nicht auszuschließen (Geoengineering Monitor 2021a). Das weiße Anstreichen von Berggipfeln wurde ebenfalls erwogen. Diese Berggipfel werden hierdurch jedoch sehr stark in ihrer ökosystemaren Funktion eingeschränkt. Daher wurde ein von der Weltbank finanziertes Projekt in den Anden Perus nicht weiterverfolgt (Geoengineering Monitor, 2021a).

Ein anderer Ansatz ist das künstliche Beschneien von Flächen, der an zwei Gletschern in der westlichen Antarktis getestet werden soll. Gemäß Feldmann et al. (2019) sollen diese mit 7.400 Gigatonnen zusätzlichem Schnee innerhalb von 10 Jahren stabilisiert werden. Hierzu ist jedoch neben weiterer Infrastruktur u. a. die Installation von mehr als 12.000 Windturbinen, notwendig, um das Salzwasser aus dem Ozean zu gewinnen, zu entsalzen und zu Schnee umzuwandeln. Neben dem enorm hohen Wasser- und Energieverbrauch kann dies erneut das empfindliche Ökosystem der Arktis über und unter Wasser stark beeinträchtigen (Feldmann et al. 2019).

Auch mit Blick auf Wüstenlandschaften bestehen Ideen, diese weiträumig mit einer Folie aus Polyethylen abzudecken (Gaskill 2014). Hinsichtlich der Beeinträchtigung der Ökosysteme und der Verschmutzung mit Plastik gelten jedoch die gleichen Ausführungen wie bereits in Bezug auf die Abdeckung von Gletschern und arktischem Eis dargestellt. Zusätzlich würde auch der fehlende Wüstenstaub das globale Klima stark negativ beeinflussen (Geoengineering Monitor 2021a; Goudi, Middleton 2006).

#### **3.4.2 Albedo-Effekte im Nutzpflanzenanbau**

Als Möglichkeit, die Albedo in der Landnutzung zu verändern, wurde vorgeschlagen, landwirtschaftliche Nutzpflanzen durch den Einsatz von traditionellen Züchtungsmethoden oder aber Gentechnik so zu verändern, dass diese stärker reflektierende Blätter ausbilden. Verfahren, welche darauf abzielen, den Phänotyp von Nutzpflanzen bzw. ihre Phänologie (Eintritt charakteristischer Wachstumsphasen) zu verändern, werden auch als Biogeoengineering bezeichnet (Seneviratne et al. 2018). Der theoretisch erzielbare Klimaeffekt durch die Veränderung von Nutzpflanzen wurde für traditionelle Züchtungsmethoden für Nordamerika bzw. Europa mit einer Abkühlung von bis zu 1 °C berechnet und soll unter dem Einsatz von Gentechnik noch höher sein (Ridgwell et al. 2009; Singarayer et al. 2009). Soja-sorten mit unterschiedlicher Blattstruktur zeigten

jedoch keine nennenswerten Unterschiede in der Albedo (Doughty et al. 2011). Risiken bestehen zudem in Bezug auf den Nährstoffgehalt der Pflanzen, ihrer Fähigkeit zur Photosynthese und darüber hinaus in den allgemein mit gentechnisch veränderten Pflanzen einhergehenden Risiken, beispielsweise hinsichtlich der langfristigen unkontrollierbaren Veränderung der globalen Biodiversität (Geoengineering Monitor 2021a). Auch ist sehr fraglich, ob angesichts der Komplexität der Prozesse, die die Blattbildung beeinflussen, gentechnische Eingriffe überhaupt zum erwünschten Ziel führen würden.

Daneben kann allerdings auch die Direktsaat, d.h. ein Verzicht auf das Pflügen, je nach bestehender Albedo der aufstehenden Pflanze oder der sonstigen Bodenbedeckung (beispielsweise mit hellem Stroh) die Reflektion von Sonnenstrahlung erhöhen und das Aufheizen des Bodens minimieren (Seneviratne et al. 2018). Verfahren der Direktsaat werden unabhängig von der Diskussion um Geoengineering-Methoden dabei auch als vorteilhaft hinsichtlich der Entwicklung des Bodenlebens, einem verbesserten Wasser- und Nährstoffhaushalt und der Vermeidung eines Austrocknens des Bodens angesehen (Nunes et al. 2018; Yadav et al. 2019). Wird die Direktsaat jedoch mit dem Einsatz von Breitbandherbiziden wie Glyphosat bzw. dem Anbau gentechnisch veränderter Herbizid-resistenter Pflanzen verbunden, so kann dies wiederum das Bodenleben beeinträchtigen und zum weiteren Verlust der Artenvielfalt beitragen (Schütte et al. 2017).

#### **3.4.3 Rodung borealer Wälder**

Die Geoengineering Methode einer großflächigen Rodung von Wäldern nördlich des 45. Breitengrades, die dunkle Waldoberflächen durch helle weil beschneite Freiflächen ersetzen soll, wird als effektiv angesehen, um einen signifikanten Kühlungseffekt durch die geschaffenen „weißen Wüsten“ zu erzielen (Geoengineering Monitor 2021a; Lee et al. 2011). Eine großflächige Rodung von Wald – dem größten terrestrischen Kohlenstoffspeicher der Erde – steht

jedoch im direkten Konflikt zu den Zielen des Wald- und Biodiversitätserhalts. Wertvolle Flora und Fauna würde verloren gehen und erhebliche Mengen an Kohlenstoff würden aus dem Boden freigesetzt und die Erderwärmung verstärken. Deshalb besteht ein direkter Konflikt zu anderen Geoengineering-Methoden im Bereich des CDR, insbesondere der großflächig geplanten globalen Aufforstung, auch in Wüstengebieten (Branch, Wulfmeyer 2019), welche wiederum andere Probleme insbesondere bezüglich des Wasserhaushalts mit sich bringen. Dieser würde auch durch die Abholzung der borealen Wälder (wie überhaupt bei jeder Abholzung von Wäldern) empfindlich gestört. Insbesondere der Kühleffekt der Wälder durch die Verdunstung von Wasser würde entfallen, was wiederum die angestrebten Kühlungseffekte konterkariert. All die genannten trade-offs sprechen insgesamt gegen entsprechende Abholzungsmaßnahmen zur Erhöhung der Oberflächenalbedo.

#### **3.4.4 Aufhellen/Bemalen von Oberflächen**

Dachflächen, Straßenbeläge oder Gehwege hell zu streichen oder ihre Beschichtung mit reflektierendem Material ist eine weitere Methode zur Erhöhung der Oberflächenalbedo. Hell gestrichene Gebäude können die Erwärmung der Innenräume verringern und den Einsatz von Klimaanlage reduzieren – eine Vorgehensweise, die aus den weiß gestrichenen Städten des Mittelmeerraums lange bekannt ist. Innerhalb der Stadt können weiße Flächen lokal dazu beitragen, diese vor einer Überhitzung zu schützen und vermehrt Sonnenlicht in die Atmosphäre zurückzustrahlen (Georgescu et al. 2014). Allerdings ist in Bezug auf Dachflächen ihre Nutzung für die Solarenergieerzeugung effektiver, um den Klimawandel durch die Erzeugung erneuerbarer Energien – und mithin an der Quelle – zu bekämpfen. Eine damit kombinierte Dachbegrünung kühlt zudem wirksamer als eine Erhöhung der Albedo. Für andere Flächen wäre im Einzelfall zu prüfen, ob und ggf. wo durch die reflektierte Strahlung Hitzezentren entstehen, die gerade in urbanen Landschaften gesundheitliche Risiken hervorrufen können.

### **3.5 Zusammengefasste kritische Reflexion von SRM-Maßnahmen**

Alle beschriebenen SRM-Methoden haben zunächst gemeinsam, dass sie nur die Symptome der Erderwärmung bekämpfen und diese bestenfalls verlangsamen können, jedoch kein Beitrag dazu leisten, die THG-Konzentration in der Atmosphäre zu senken. Probleme, wie eine zunehmende Degradation terrestrischer Ökosysteme oder die Ozeanversauerung, welche im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung auftreten, bleiben demnach weiter bestehen.

Die Reduktion der den Erdboden erreichenden Strahlung ist der gemeinsame Nenner der in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 beschriebenen Vorschläge (Strahlungsabschirmung in Weltraum, Wolken und Stratosphäre). Wenn aber die Sonneneinstrahlung reduziert wird, ändert sich nicht nur die Erdtemperatur, sondern auch die Funktionsfähigkeit natürlicher und technischer Systeme. So zeigen Proctor et al. (2018), dass die zu erwartende Verringerung der globalen Ernteerträge durch derartige Maßnahmen dieselbe Größenordnung hätte wie die durch die – hypothetisch – vermiedene Aufheizung des Weltklimas. Was sich aber nicht notwendig ändert ist die Erderwärmung, da sie – wie Schneider et al. (2020) gezeigt haben, nicht nur von der Sonneneinstrahlung abhängt.

Welche Effekte sich damit für die Bereitstellung erneuerbarer Energien ergäben ist bisher nicht untersucht – eine wichtige Frage, denn nicht nur Solarstrom, auch Solarwärme, Wind- und Wasserenergie hängen von der Sonneneinstrahlung und ihren Effekten ab.

Zudem fällt insbesondere bezüglich SRM-Verfahren, welche auf eine Erhöhung der Wolkenalbedo oder die zusätzliche Injektion von Aerosolen in die Atmosphäre abzielen, die bisher bestehende Abhängigkeit von fossilen Energien zum Einsatz der jeweiligen Techniken ins Auge. Die THG-Emissionen würden somit durch die hohe Energieintensität entsprechender SRM-Verfahren zumindest für die nächsten ein bis zwei Jahrzehnte signifikant erhöht werden – und das

ist genau der kritische Zeitraum, um den Klimawandel zu begrenzen.

Zudem können viele der Verfahren bisher nicht großtechnisch umgesetzt und angewandt werden, sondern existieren, abgesehen von einzelnen Forschungsinitiativen, nur als Modelle. Dabei sind insbesondere (jedoch nicht ausschließlich) die SRM-Methoden mit Bezug zur Atmosphäre mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese lassen weder verlässliche und genaue Vorhersagen über das Ausmaß der erzielbaren Effekte auf den Temperaturhaushalt der Erde zu noch können alle hieraus erwachsenden Risiken ausreichend abgeschätzt werden. Die potenziellen negativen Effekte reichen dabei von gestörten Ökosystemfunktionen und Biodiversitätsverlusten, einem global oder regional stark veränderten Niederschlagsregime über regionale Temperaturungleichgewichte bis hin zu negativen Folgen für die terrestrische und marine Photosyntheseleistung (Irvine et al. 2019). Es ist unmöglich, alle potenziellen negativen Auswirkungen von entsprechenden Eingriffen in die Atmosphäre bzw. auch terrestrische Umwelt verlässlich vorherzusagen. Zudem haben die Ergebnisse kleinskaliger Versuche, z.B. zur Entwicklung von Turbulenzen nach Aerosol-Injektionen (<https://geoengineering.environment.harvard.edu>), nur begrenzt Aussagekraft für die Wirkungen im komplexen atmosphärischen Gesamtsystem. Kleinräumige Versuche haben in der Atmosphäre keine nachweisbare Wirkung, und großräumige Versuche wären mit denselben Risiken verbunden, wie die endgültige Anwendung. Selbst Befürworter von atmosphärischen SRM-Methoden räumen daher ein, dass ein großtechnischer Einsatz dieser Technologien (der bisher nur in der Theorie existent ist) viele Unsicherheiten birgt und zudem unter Berücksichtigung aller Kosten vermutlich unwirtschaftlich ist (Crutzen, 2006; Pierrehumbert, 2017; Wigley, 2006).

Dabei sind für jede der benannten SRM-Technologien grenzüberschreitende Auswirkungen und geografische Heterogenitäten nicht nur nicht mit Sicherheit auszuschließen, sondern vielmehr erwartbar, selbst wenn sie

nur zum Zweck der wissenschaftlichen Forschung eingesetzt würden. Insbesondere durch die Beeinflussung der Niederschläge oder die Bildung von potenziell dürrer- oder flutverursachenden Wolken können sich regional bestehende klimatische Ungleichheiten zusätzlich verstärken und somit der Zugang zu Nahrung und Wasser für Millionen von Menschen gefährdet sein (Climate Action Network Europe, 2019; Preston, 2013; Whyte, 2012). In diesen Effekten liegt auch das Risiko begründet, das Manipulationen der Atmosphäre als Waffen in Konflikten eingesetzt werden könnten.

Vorhaben wie die Anreicherung der Atmosphäre mit Schwefeldioxid sind weder technisch besonders anspruchsvoll noch unbezahlbar. Theoretisch wäre es deshalb möglich, dass ein Land oder sogar ein einzelner Milliardär mit Raketentechnologie ein solches Projekt im Alleingang startet und kurzfristig umsetzt. Da Aktionen in einem Land, sei es um weitergehende Emissionsreduzierungen zu umgehen oder als „Notwehrmaßnahme“ von Staaten, die sich in ihrer Existenz durch die Klimakrisenfolgen bedroht sehen, notwendig auf das globale Klima zielen müssen um wirksam zu sein, führt auch das zu politischen und potenziell auch militärischen Konflikten. Als mögliche Motive nennt Sovacool (2021) einen Eingriff Chinas, um das Abschmelzen der Gletscher im Himalaya zu beenden und so die Trinkwasserversorgung langfristig zu sichern (das gleiche Motiv könnte auch Indien zu so einem Schritt bewegen), oder die USA könnten einen solchen Schritt tun, um zu verhindern das durch das Abschmelzen von Eismassen in Grönland und der Antarktis der Meeresspiegel so steigt, dass Florida (und mit ihm zahlreiche Küstenstädte) überflutet würde (Sovacool 2021). Staaten würden mit solchen Maßnahmen gegen die „Konvention über das Verbot von militärischen oder sonstigen feindseligen Nutzungen von Umweltmodifikationstechniken“ verstoßen (Konvention 1977), aber eine Regelung für Privatunternehmen gibt es noch nicht.

Die Auswirkungen auf bestimmte Erdregionen wären dabei weitaus gravierender als auf andere, was ver-

schärfend auf mögliche Konflikte wirkt und die Wahrscheinlichkeit kriegerischer Auseinandersetzungen erhöht (Biermann und Möller, 2019; Scheffran 2020). Das bewegt Juristen bereits zu Diskussionen, ob die dann zu erwartenden Gegenmaßnahmen (Abatayo et al. 2020), einschließlich möglicher Militärschläge gegen die SRM-Einrichtungen, legal sein könnten, z.B. wenn der UN-Sicherheitsrat die Pläne als „eine Bedrohung für den internationalen Frieden und die Sicherheit“ einschätzen würde (Craig 2021).

Nicht zuletzt beruht der Grundansatz, die Klimakrise über eine Reduzierung der Sonneneinstrahlung lösen zu wollen, auf einem extrem engen und damit falschen Problemverständnis: die übrigen Folgen steigender CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wie die Versauerung der Ozeane und damit die Gefährdung einer wichtigen Eiweißquelle und die Reduzierung der Ernteerträge durch verminderte Sonneneinstrahlung werden ebenso ignoriert wie die potenziellen Auswirkungen auf die Bereitstellung erneuerbarer Energien und die Tatsache, dass die direkte Interaktion von Treibhausgasen und Wolken ebenfalls die Wärmebilanz beeinflusst.

Dennoch verstehen zahlreiche Autor\*innen Geoengineering als Ersatz für Maßnahmen der Emissionsreduktion und der Klimafolgen-Anpassung, was sich besonders deutlich zeigt, wenn Geoengineering und Emissionsreduktion einander gegenübergestellt werden und die „Kostenvorteile“ von Geoengineering berechnet werden. So betont Sovacool (2021: 6) dass Optionen wie SRM preiswert sind, verglichen mit den Kosten für Emissionsreduktion (Mitigation) oder Anpassung. 2009 schätzte das National Bureau of Economic Research der USA, dass Temperaturstabilisierung durch Geoengineering nur den Bruchteil eines Prozent des BIP kosten würde, verglichen mit mehreren Prozent für die Emissionsvermeidung (Morgan 2009) (d.h. ähnlich viel wie das Militärbudget zurzeit beträgt). 2015 aktualisierten sie ihre Zahlen und berechneten die Kosten für die Injektion von Aerosolen in die Atmosphäre auf 20–25 Milliarden US\$ in den 1–2 Jahren, die für eine Abkühlung notwendig

wären, wenn man die Aerosole mit Artilleriegeschützen und Ballons ausbringen würde, und auf 0,2 bis 30 Milliarden \$, wenn man dazu hochfliegende Flugzeuge benutzen würde. Demgegenüber wären die Kosten für die Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre mit 200 \$/t CO<sub>2</sub> immens, auch wenn davon ausgegangen wird, dass der Preis auf 30 \$/t sinken könnten (Heutel et al. 2015) (zur direkten Entnahme aus der Luft s. Kapitel 2.2.2 zu DACCS).

Solche Berechnungen sind keine abstrakten, jeder technischen Grundlage entbehrenden Übungen, sondern Teil einer systematischen Vorbereitung auf den Einsatz von Geoengineering. Auch wenn seriöse Organisationen wie die Harvard University in Cambridge, MA, USA, stets betonen, dass Geoengineering kein Ersatz für Klimapolitik sei und die Forschung nur der Vorsorge diene, sind die laufenden Forschungsprogramme sehr anwendungsorientiert (nicht nur Technologien, sondern auch Geoengineering Governance wird untersucht), und die Verlautbarungen außerhalb wissenschaftlicher Publikationen werben stark für eine zügige Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis (<https://geoengineering.environment.harvard.edu>).

### 3.6 Fazit

**Alle Formen des Solar Radiation Management bekämpfen nur eine (wichtige) von zahlreichen Folgen der steigenden Treibhausgasemissionen und adressieren nicht die Ursachen. Sie sind deswegen – selbst wenn sie ohne Nebenwirkungen effektiv wären – als politische Strategien ungeeignet.**

**Zudem sind die vorgeschlagenen Verfahren von zweifelhafter Machbarkeit und hätten mit hoher Wahrscheinlichkeit unverantwortbare globale Folgen für Umwelt, Ernährung und menschliche Gesellschaften.**

**Öffentliche Investitionen in die Entwicklung solcher Technologien und „Vorsorge“-Experimente sollten sofort beendet werden.**

## 4. BUND: Ökologischer Klimaschutz – Sequestrierung ohne Geoengineering

Die Begrenzung der Klimakatastrophe und die Transformation zu einer zukunftsfähigen Wirtschaft und Gesellschaft erfordern wirksames globales Handeln. Wirksames Handeln verlangt allen Staaten Strategien, die anerkennen, wie grundlegend der Wandel von Form, Funktionsweise und Produkten von Wirtschaft und Konsum sein muss, und von den Industriestaaten die Anerkennung ihrer Verantwortung für diese kritische Situation. Der notwendige Wandel 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; Spangenberg, Kurz 2023). Insofern ist es nicht überraschend, dass die politische Diskussion kontrovers ist – auf der einen Seite warnen Wissenschaftler\*innen und Institutionen wie das Umweltbundesamt (UBA 2011) und der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU 2020) vor Überschätzung der Wirksamkeit und Unterschätzung der (nicht nur) ökologischen Folgen; auf der anderen Seite regen sich im politischen Raum Stimmen, die Geoengineering inklusive SRM als Option befürworten, weil sonst die Klimaziele nicht erreichbar seien. Dahinter steht oft die Annahme, dass ein weiteres Wachstum von Wirtschaft und Ressourcenverbrauch unvermeidlich oder unverzichtbar sei, und das Ziel, den status quo durch technische Maßnahmen vor einem tiefgehenden Wandel zu schützen (Pomrehn 2010; Sikka 2020). 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 CO<sub>2</sub>-Äquivalenten wirklich rückgängig gemacht werden können – ein Grund mehr bei der Analyse und Bewertung solcher Vorschläge auch das diskursive Framing mit in den Blick zu nehmen.

Die eingangs genannte Definition von Geoengineering stellt klar, dass nicht jede Form der Förderung von Maßnahmen, die der Atmosphäre Kohlenstoff entziehen, auch Geoengineering ist. In diesem Kapitel

stellen wir die vom BUND unterstützten Ansätze dar, die dem Klimaschutz dienen ohne andere Aspekte wie Natur- und Ressourcenschutz zu vernachlässigen. Dabei geht es vor allem darum, aktive ökologische Systeme darin zu unterstützen, CO<sub>2</sub> zu binden und den Kohlenstoff zuerst in der Vegetation und dann im Boden für längere Zeiträume zu fixieren. Das setzt gesunde Ökosysteme und einen Schutz der biologischen Vielfalt voraus. Die Speicherung im Boden hat sich vor Ort insbesondere beim ökologischen Landbau und in der Forstwirtschaft bewährt. Aber auch Maßnahmen wie Agroforstwirtschaft, Sanierung kontaminierter und degradierter Böden, ökologischer Landbau und eine naturschützende 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 oft nur ein willkommenes Nebeneffekt ist. Der Nährstoffgehalt der Böden und die Nahrungssicherheit werden positiv beeinflusst.

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 (Fatheuer 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).

Das UBA hat in seiner Rescue Studie dargestellt, dass Klimaneutralität in Deutschland ausschließlich mit solchen natürlichen Senken erreicht werden kann (UBA 2019). Dies setzt jedoch voraus, dass drastische Emissions- und Energieverbrauchs-Minderungsmaßnahmen umgesetzt werden. Das Potenzial der Kohlenstoffbindung in Land- und Forstwirtschaft erkennt auch das IPCC, AG 3, und stellt fest „Aufforstung, Wiederaufforstung, verbessertes Forstmanagement, Agroforstwirtschaft und Kohlenstoffbindung im Boden sind derzeit die einzigen weitverbreiteten CDR-Methoden“ (Nabuurs et al. 2022: C.11.1). Der Bericht betont, dass Maßnahmen, „wenn sie nachhaltig umgesetzt werden, in großem Umfang Treibhausgasemissionen senken und Entnahmen erhöhen“ Dennoch können sie „verspätete Maßnahmen in anderen Sektoren nicht vollständig ausgleichen“ (Nabuurs et al. 2022: C.9).

„Negative Emissionen“ sind dann, und nur dann, vermeidbar, wenn es gelingt, den Primärenergieverbrauch um 50% zu senken – das entspricht auch den Zielen der Energieeffizienzstrategie 2050 der Bundesregierung. Sie hat sich zum Ziel gesetzt, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2030 um 30% und bis zum Jahr 2050 um 50% gegenüber 2008 zu senken (Bundesregierung 2019). Die höhere Effizienz der Stromnutzung und das auslaufende Wirtschaftswachstum können dabei behilflich sein (Spangenberg, Kurz 2023). Das ist jedoch mit Technologie alleine nicht zu erreichen, es bedarf auch Änderungen von Konsumniveaus und Lebensstilen sowie institutioneller Stützungen, von Preisen über Angebote bis zu Radwegen (DE-IPCC 2022c). Sowohl die Halbierung des Primärenergieverbrauchs wie eine umfassende Suffizienzpolitik zur Förderung neuer, klimaverträglicher sozialer Praktiken sind seit Jahren Forderungen des BUND (z.B. BUND 2017). Werden diese tiefgreifenden gesellschaftlichen Transformationen erreicht, dann reichen die natürlichen Prozesse der Kohlenstoffbin-

dung in Ökosystemen, die durch Managementeingriffe intensiviert werden können, um die wirklich unvermeidlichen Restemissionen auszugleichen.

#### 4.1 Ökologisierung der Landwirtschaft

Eine natur- und umweltverträglichen Landwirtschaft verringert als Nebeneffekt auch die Emissionen. Dazu gehören eine artgerechte Tierhaltung insbesondere von Weidetieren, und nicht zuletzt der Ausstieg aus der Nutzung von mineralischem Dünger (wegen des hohen Energieverbrauchs des Haber-Bosch-Verfahrens zur Stickstofffixierung) und seinen teilweisen Ersatz durch organische Düngemittel. Zudem bindet der ökologische Landbau durch eine höhere temporäre Kohlenstoffbindung deutlich mehr CO<sub>2</sub> als der konventionelle Landbau (FAO 2019). Das erfordert jedoch auf Konsument\*innenseite eine tiefgreifende Ernährungsumstellung, insbesondere eine Reduzierung des weitgehend stagnierenden Fleischkonsums in Deutschland und Europa, und die Umkehrung des gegenwärtigen Trends zu steigendem Konsum tierischer Proteine insbesondere in Asien (BUND 2022a).

Weiterhin hohe Einsatzmengen von mineralischen Stickstoffdüngern führen zu anhaltenden Lachgas (N<sub>2</sub>O) Emissionen (kritisch wegen der langen atmosphärischen Verweilzeiten), die in den Szenarien, die unter 1,5 ° bleiben, „negative Emissionen“ (s.o.) erforderlich machen. Eine weltweite Umstellung auf ökologischen Landbau als Alternative wird in den vom IPCC ausgewerteten Szenarien nicht betrachtet; nicht erwähnt wird auch 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 Mineräldüngereinsatz, die sich noch erhöhen können, wenn zusätzlich zur Nahrungsmittelproduktion industriell nutzbare Biomasse erzeugt werden soll. Das gilt umso mehr in den Szenarien, die mit erheblichen Mengen an Agroenergie kalkulieren (Biogas und Treibstoffersatz), die unter massiven Düngereinsatz erzeugt werden (IPCC 2018). Ähnliches gilt für Methan-Emissionen (CH<sub>4</sub> ist

kritisch wegen der hohen Emissionsmengen aus Nassreisanbau und Rinderhaltung), die die Modelle ebenfalls nur teilweise abbilden können. 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 auch vom IPCC diskutiert, aber nur in wenigen Szenarien abgebildet.

Leistungen des Ökolandbau, die berücksichtigt werden müssen, liegen insbesondere in den Bereichen der Agro- wie der Bodenbiodiversität, die nicht nur zur langfristigen Ertragssicherung beitragen, sondern auch zu einer deutlich höheren Kohlenstoffspeicherung durch einen höheren Humusgehalt der Böden, und zu verringerten Lachgasemission führen (Sanders, Heß 2019). Nachhaltige, artgerechte Tierhaltungssysteme zeichnen sich durch mehr Platzbedarf in der Haltung und angepasste Fütterung aus, die z.B. bei Wiederkäuern in erster Linie auf der direkten Verwertung des Aufwuchses des Graslandes beruht und damit nicht in Konkurrenz zur menschlichen Ernährung steht. Der Anbau von Futter im Ackerbau mit seinen höheren Emissionen an Lachgas wird deutlich reduziert. Der BUND fordert zunächst eine flächengebundene Tierhaltung in Kombination mit der Reduzierung der Tierbestände um 50–75%, mit maximal 2 Großvieheinheiten pro Hektar, um so dem Ziel des Pariser Klimaabkommens gerecht zu werden und hohen Nutztierkonzentrationen, damit regionalen Nährstoffüberschüssen und der Industrialisierung der Landwirtschaft entgegenzuwirken. Da die Maßnahmen zur zukunftsfähigen Landbewirtschaftung wie optimierte Fruchtfolgen, Ökolandbau, Agroforstwirtschaft und Agrarökologie nicht primär auf Kohlenstoffbindung abzielen, sind sie klimanützlich, aber nicht Teil von Geoengineering. Das gilt erst recht für die Emissionsreduktion aus der Tierhaltung, da die Verringerung von Treibhausgas-Emissionen generell nicht Gegenstand des Geoengineerings ist.

## 4.2 Wiedervernässung von Mooren

Obwohl Moore weltweit nur drei Prozent des Landes bedeckten, speicherten sie etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie in der Biomasse aller Wälder der Erde zusammen, die mit 27% fast ein Drittel der Landfläche ausmachen.

Die Trockenlegung von Mooren ist mit über zwei Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> für rund vier Prozent aller menschengemachten Emissionen verantwortlich. Bereits jetzt sind global über 10% der 500 Millionen Hektar Moore entwässert, in Deutschland und in Mitteleuropa weit über 90%. In Deutschland sind trockengelegte Moore für etwa sieben Prozent aller Treibhausgasemissionen, in der Landwirtschaft sogar für über 37% aller Treibhausgase verantwortlich. Jedes Jahr kommen weltweit weitere 500.000 Hektar zerstörte Moore hinzu – damit gehen ihre Torfschichten zehnmal schneller verloren als sie in intakten Mooren wachsen (HBS et al. 2023). Die weltweite Entwässerung von Mooren verursacht deutlich mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen als der globale Flugverkehr. Haupttreiber der globalen Moorzerstörung sind die Land- und Forstwirtschaft, die neben der Entwässerung für Acker-, Forst- und Grünlandflächen in Europa auch beispielsweise in Südost-Asien für die Abholzung und Trockenlegung von Moorregenwäldern für Palmölplantagen verantwortlich ist.

Moore sind also entscheidend für den Klima- wie auch Biodiversitätsschutz und schützen unser Wasser. Sie gehören zu den am stärksten gefährdeten Lebensräumen in Europa, und damit sind auch alle Arten bedroht, die auf Moorstandorte angewiesen sind. Für die Klimakrise und das Artensterben wirkt die fortschreitende Moorzerstörung wie ein Brandbeschleuniger. Sie sind als Wasserspeicher in Zeiten des Klimawandels von zunehmender Bedeutung auch für die menschliche Versorgung.

Um das im Pariser Klimaschutzabkommen vereinbarte 1,5 Grad-Ziel zu erreichen, müssen bis 2050 die globalen Netto-Emissionen auf null gesenkt werden.

Dafür werden insbesondere auch intakte Moore als Senken benötigt, denn Moore stellen unter den Land-lebensräumen besonders potente CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Potenzial zur Renaturierung aufweist, in einen natürlichen Zustand zurückzubringen (Harenda et al. 2018). In Zahlen und Fläche bedeutet das: In Deutschland müssen jährlich mindestens 50.000 Hektar Moorböden wiedervernässt werden – eine Fläche fast so groß wie der Bodensee; weltweit sind es zwei Millionen Hektar pro Jahr (HBS et al. 2023). Die Regeneration natürlich wachsender Moore, insbesondere Hochmoore, muss auch Vorrang vor Nutzung von Moorflächen haben. Eine wirtschaftliche Nutzung von Niedermoorflächen durch Paludikultur kann Bauern eine Einkommenskompensation bieten, ist vermutlich keine effektive Klimaschutz-Lösung – der Paludikulturanbau ist zwar ein Fortschritt gegenüber konventioneller Landnutzung auf Moorflächen, bietet in der Regel aber nicht das Potenzial für eine dauerhafte CO<sub>2</sub>-Deposition (Ziegler 2020). Darüber hinaus ist ein weltweites Moratorium zum Torfabbau dringend erforderlich.

### 4.3 Aufforstung und Wiederbewaldung

Die weltweiten Waldbrände in den Sommern 2019, 2020 und 2022 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 und der Kongo) oder unterirdisch (besonders boreale Wälder z.B. in Sibirien), sie sind auch Heimstatt vieler Arten und regulieren durch ihre Verdunstungsleistung das globale wie das regionale Klima, verringern die lokale Erhitzung und steuern weiträumig die Niederschläge (Ruiz-Vásquez et al. 2020; Seymour et al. 2022).

So haben Smith et al (2023) erstmals zeigen können, dass die tropischen Wälder im Amazonas- und im Kongobecken sowie in Südostasien die Niederschlagsmengen mehrere hundert Kilometer entfernt signifikant beeinflussen; sie erwarten signifikante Niederschlagsverluste und Probleme für die regenbasierte Landwirtschaft als Folge von Entwaldung.

Hinzu kommen die physikalischen Effekte, die über die reine Kohlenstoffspeicherung hinausgehen. So fanden Lawrence et al. (2022), dass Wälder Chemikalien, so genannte biogene flüchtige organische Verbindungen (BVOC), emittieren, die Aerosole erzeugen, die einfallende Energie reflektieren und Wolken bilden – beides sind kühlende Effekte. Sie führen zwar auch zu einem Anstieg von zwei Treibhausgasen (bodennahes Ozon und Methan), doch in der Summe überwiegt die Abkühlung die Erwärmung. Tiefe Wurzeln, effiziente Wassernutzung und die so genannte Rauigkeit des Kronendachs ermöglichen es den Wäldern auch, die Auswirkungen extremer Hitze abzuschwächen. Diese physikalischen Eigenschaften ermöglichen es den Bäumen, Wärme und Feuchtigkeit von der Erdoberfläche wegzuleiten, was die lokale Umgebung direkt abkühlt und die Wolkenbildung und den Niederschlag beeinflusst – mit weitreichenden Klimawirkungen. Intakte Wälder sind ein essenzieller Bestandteil des Landschaftswasserhaushalts. Infolgedessen überwiegen die biophysikalischen Auswirkungen der Wälder in allen Breitengraden bei weitem die CO<sub>2</sub>-Effekte und fördern die lokale Klimastabilität, indem sie extreme Temperaturen zu allen Jahres- und Tageszeiten reduzieren (Seymour et al. 2022). Die Bedeutung der Wälder für die Abschwächung des globalen Klimawandels, für den Wasserkreislauf und für die lokale Anpassung menschlicher und nicht-menschlicher Arten wird von den derzeitigen kohlenstoffzentrierten Messgrößen nicht angemessen erfasst, insbesondere nicht im Zusammenhang mit der künftigen Klimaerwärmung.

Betrachtet man das Baumwachstum in Wäldern als eine Art Kollektor für Sonnenenergie, beträgt der

„Wirkungsgrad“ nur etwa 1–2 kWh Energie/m<sup>2</sup> im Jahr im Ackerbau mit einer CO<sub>2</sub>-Bindung von 2 kg/m<sup>2</sup>\*a; ausgewachsener Wald liefert ca. 1 kWh Energie/m<sup>2</sup>\*a bei einer CO<sub>2</sub>-Bindung von 1 kg/m<sup>2</sup>\*a oder 10 t CO<sub>2</sub>-Bindung/ha\*a. In Altwäldern findet CO<sub>2</sub>-Deposition in Form großer Mengen von Falllaub und Totholz statt, von denen ein großer Teil dauerhaft in Böden festgelegt wird. Dies, und die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung durch die Nutzung von Holz in langlebigen Produkten stehen in Konkurrenz zu den technischen Verfahren der Biomassennutzung, wie sie der IPCC-Bericht beschreibt. Gerade in den Wäldern der borealen Zone, die aufgrund der Stauwirkung der unterliegenden Dauerfrostböden und den geringen Verdunstungsraten oft vermoort sind, findet eine starke CO<sub>2</sub>-Bindung statt. Dabei ist der Flächenbedarf bei Verfahren, die auf CO<sub>2</sub>-Bindung durch Pflanzenwachstum abzielen, generell sehr hoch. 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) als effektive Kohlenstoffspeicher. Dies gilt umso mehr als Mills et al. (2023) festgestellt haben, dass nach einer Störung nachwachsende Wald-Biomasse zwar CO<sub>2</sub> bindet, aber über den 10-jährigen Beobachtungszeitraum die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus Totholz und Boden die CO<sub>2</sub> Fixierung um das Doppelte überstieg. Weite Teile des Amazonas sind so von einer Kohlenstoffsenke zu einer Emissionsquelle geworden (Gatti et al. 2021).

So hilfreich also Wälder für Klimaregulation, Landschaftswasserhaushalt und biologische Vielfalt sind, ist die Art der Baumpflanzung entscheidend dafür, ob die getroffenen Maßnahmen nachhaltigkeitsgerecht sind. So sollten in jedem Fall standortgerechte, meist heimische Baumarten gewählt werden, Mischwälder statt Baumplantagen angelegt werden, und gentechnisch veränderte Bäume sind grundsätzlich für den Weldaufbau ungeeignet. Versuche wie die der US Firma Living Carbon, Pappeln gentechnisch zu manipulieren um das Wachstum zu stärken und so

mehr Kohlenstoff zu binden sind einseitige technizistische Lösungsversuche, die die schlechten Erfahrungen anderer Gentechnik-Organismen mit erhöhten Wachstumsraten ebenso ignorieren wie die schlechten ökologischen Erfahrungen mit der Anpflanzung schnellwachsender Baumarten, die u.a. den Wasserhaushalt schädigen. Zugleich arbeitet die Firma an Genmanipulationen die verhindern, dass nach der Ernte die im Boden verbliebenen Wurzeln von Pilzen abgebaut werden können und beabsichtigt, den in diesen fäulnisresistenten Plantagen „gespeicherten“ Kohlenstoff als „carbon offsets“ an multinationale Holzkonzerne und Großgrundbesitzer für industrielle Plantagen zu verkaufen die es den Käufern ermöglichen, sich „klimaneutral“ zu rechnen statt Emissionen einzusparen (Living Carbon Team 2023).

#### 4.3.1 Wiederbewaldung

Laut FAO (2016) sind in den letzten 5.000 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 aus vorwiegend einheimischen Baumarten, die unter Berücksichtigung des Klimawandels dem Artenspektrum der jeweiligen Naturwälder entsprechen, insbesondere weil dies dem Schutz der biologischen Vielfalt dient (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.

Auch in Europa, wo die Waldflächen in den letzten Jahrzehnten tendenziell gewachsen sind, kann die Wiederbewaldung mit standortgerechten Baumarten (unter Berücksichtigung des Klimawandels, und ggf. unterstützt durch „lebendige Samenbanken“, d.h. die Samensammlung von besonders klima-resilienten Einzelbäumen) und Agro-Forst-Systeme kann die biologische Vielfalt schützen, zur Sicherung des Wasserhaushalts beitragen und Hochwasser als Folge von

(infolge des Klimawandels vermehrt auftretenden) Starkregen verringern (IPCC 2022b: D.2.1) – allerdings erst über eine meist ausgedehnte Wachstumsperiode. Diese beginnt jedoch nicht erst, wenn die Bäume aufgewachsen sind, sondern schon in frühen Sukzessionsstadien, die bereits eine hohe Kohlenstoffbindung aufweisen. Diese Vorteile, und die signifikanten Beiträge zum Landschaftswasserhaushalt, kann keine andere Form der Kohlenstoffbindung bieten.

#### 4.3.2 Aufforstung

Aufforstung – das heißt ein großflächiges Pflanzen von Bäumen auf bisher nicht bewaldeten Flächen – wird regelmäßig als ein wichtiger Bestandteil von Geoengineering beschrieben (IPCC 2018) und ist, nicht zuletzt aufgrund der hiermit einhergehenden Landnutzungsänderung, ein zweischneidiges Schwert. Die Aufforstung von Grasland-Ökosystemen oder (noch) diversifizierten Agrarlandschaften mit Monokulturen oder invasiven Arten kann signifikante negative Folgen für die biologische Vielfalt haben oder sogar dazu beitragen, dass die Speicherung von Kohlenstoff insgesamt sinkt. Dies kann z.B. durch die Öffnung des Bodens bei der Pflanzung und den hiermit einhergehenden Verlust des Bodenkohlenstoffs, oder aber durch eine Erhöhung der Waldbrandgefahr durch die neue Vegetation (und den hierdurch geänderten Wasserhaushalt) verursacht werden (de Rigo et al. 2017; Seidl et al. 2017).

Aufforstung und der Wiederbewaldung sind jedoch nicht immer klar abgrenzbar; insbesondere kann Wiederbewaldung dann als ein Bestandteil von Geoengineering angesehen werden, wenn aus ökonomischen Gründen und zur Maximierung der CO<sub>2</sub>-Bindung schnellwachsende Baumarten angebaut, Rotationszeiten verkürzt oder das Restholz nicht im Wald belassen wird, mit negativen Folgen für die Biodiversität (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 Stickstoff (chemisch: N) und Phosphor (P) um das Dreifache,

und die von Kalium K, Kalzium Ca und Magnesium Mg um das Drei- bis Fünffache (Englisch 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 erforderliche verstärkte Düngung der Wälder würde ihrerseits wieder zu Treibhausgasemissionen beitragen, durch den Energieeinsatz sowie durch die Ausgasung von Lachgas N<sub>2</sub>O. Nicht zuletzt diese Effekte machen auch Pläne illusorisch, durch großflächige Aufforstung von Wüstengebieten neue Kohlenstoffsinken zu schaffen (Branch, Wulfmeyer 2019), die zudem die globale Niederschlagsverteilung verändern, die Luftzirkulation stören und die klimawirksame Albedo erhöhen würden.

Zudem könnten selbst große Aufforstungsprojekte nur einen Bruchteil der jährlichen Emissionen binden – ein Drittel nach der Schätzung von Bastin et al. (2019), die ein zusätzliches Potenzial für 900 Mio. ha Waldfläche berechnet haben (derzeitige Waldfläche weltweit ca. 4.000 Mio. ha – sinkend). Unter diesen Annahmen könnten 750 Gt CO<sub>2</sub> in (wieder)aufgeforsteten Wäldern gespeichert werden. Die Annahmen sind jedoch – insbesondere unter dem Voranschreiten des Klimawandels und der Tatsache, dass junge Wälder vielfach zunächst Kohlenstoffquellen und keine -senken sind – sehr optimistisch (Jandl et al. 2007). Veldman et al. (2019) schätzen sogar, dass der hier berechnete Klimaeffekt mindestens um den Faktor 5 überschätzt wird, da zudem die Zuwächse an organischer Bodensubstanz bei der Anpflanzung von Bäumen vermutlich wesentlich geringer sind und der Albedo Effekt unzureichend berücksichtigt wird. All dies zeigt, dass – obgleich Wälder ein hohes Potenzial haben, als CO<sub>2</sub>-Speicher wirken zu können, dieses nicht überbewertet werden sollte. Insofern ist auch die Bindung von atmosphärischem Kohlendioxid durch Photosynthese ist nicht ohne Risiken, denn eine Politik, der von unrealistisch großen Mengen zukünftiger Kohlenstoffspeicherung ausgeht, könnte dazu führen, dass die Gesellschaft kurzfristige Ziele fest-

legt, die zu unambitioniert sind, und in der Folge das Kohlenstoffbudget erheblich überschreitet, ohne dass es eine Möglichkeit gibt, den Schaden rückgängig zu machen. Erstens sind unter Berücksichtigung sozial-ökologischer Bedingungen 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, wird deutlich, dass sie weit überwiegend negativ sind (Malkamäki et al. 2018). Zweitens werden weitere „verborgenen Emissionen“ der Aufforstung meist nicht betrachtet. Hierbei handelt es sich beispielsweise um 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).

#### 4.3.3 Holznutzung

Hinsichtlich der nach wie vor notwendigen Holznutzung und der potenziellen energetischen Verwertung von Holzbiomasse lässt sich feststellen, dass es im Gegensatz dazu, Holz in BECCS-Verfahren einzusetzen und energetisch zu nutzen, sinnvoller ist, Holz erst zu verbrennen, nachdem es zuvor stofflich genutzt wurde (Kaskadennutzung). Diesen Vorrang der stofflichen vor der energetischen Nutzung schreiben auch die Bioökonomie-, die Biomasse- und die Carbon Management Strategien der Bundesregierung vor – für die direkte energetische Nutzung bleiben dann nur die Rest- und Abfallholzbestände, wie z.B. das Sägemehl aus holzverarbeitenden Betrieben (Rinde und Kleinholz müssen aus Gründen der Nährstoffbilanz im Wald verbleiben). Bei stofflicher Nutzung wirkt Holz nicht nur als Speicher, sondern ersetzt auch den Einsatz von Beton und Zement beim Bau von Gebäuden als Bau- 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 und Europa ca. 40–50 Jahre<sup>3</sup>, eine Zeitdauer (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt 2017), die mit der Lebensdauer eines lebenden Baumes nicht mithalten kann.

Darauf weist auch das IPCC hin: „Aufforstung, verbessertes Forstmanagement, Kohlenstoffbindung im Boden, die Wiederherstellung von Torfmooren sowie das Management von Blauem Kohlenstoff (Ozeane absorbieren etwa ein Drittel des CO<sub>2</sub>, das wir ausstoßen) sind Beispiele für Methoden, die je nach Kontext die biologische Vielfalt und Ökosystemfunktionen, die Beschäftigung und lokale Existenzgrundlagen verbessern können [...]. Im Gegensatz dazu können Aufforstung oder der Anbau von Biomasse für BECCS oder Biokohle, wenn sie schlecht umgesetzt werden, negative sozioökonomische und ökologische Folgen haben, unter anderem auf die biologische Vielfalt, die Ernährungs- und Wasserversorgungssicherheit, lokale Existenzgrundlagen und auf die Rechte indigener Völker, insbesondere wenn sie in großem Maßstab und an Orten mit unsicheren Landbesitzverhältnissen umgesetzt werden“ (Nabuurs et al. 2022: C.11.2).

#### 4.4 Steppen

Auch Savannen, Steppen und sogar Halbwüsten spielen als CO<sub>2</sub>-Senke eine erhebliche Rolle (Dass et al. 2018; Song et al. 2018). Allerdings sind Hochgrassteppen mit fruchtbaren Schwarzböden wie in der Ukraine und Russland heute fast vollständig in Ackerbaugelände umgewandelt worden, die für die Ernährung der Weltbevölkerung eine wichtige Rolle spielen. Weniger fruchtbare Steppenbereiche müssen zum Schutz der biologischen Vielfalt wie für die Lebensbedingungen der traditionellen Bewohner- und Nutzer\*innen weiterhin als Grasland erhalten bleiben (Mannetje et al. 2008). Das erfordert eine deutliche Reduzierung der Viehmengen, um die Überweidung und damit verbundene Degradierung der Böden auf-

<sup>3</sup> Aufgrund der sich rasch ändernden Artenzusammensetzung der Wälder, mit höherem Laubholzanteil und neuen Anwendungsgebieten für Holz, unterliegen die Zahlen einem fortschreitenden Wandel (Rabke 2022).

zuhalten und soweit möglich umzukehren. Als willkommener Nebeneffekt ergibt sich eine deutliche Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Fixierung in Steppenökosystemen.

#### 4.5 Urbane Räume

Eine zukunftsfähige Gestaltung städtischer Räume kann Klimafolgenanpassung mit Klimaschutz und Kohlenstofffixierung verbinden, den lokalen Wasserhaushalt stabilisieren und die gesundheitlichen Beeinträchtigungen verringern. Dazu ist der Ausbau der sogenannten grünen und blauen Infrastruktur in Städten notwendig, also neben Verkehrs- und baupolitischen Maßnahmen die Vergrößerung von Grünflächen, Begrünung von Dächern und Fassaden in Verbindung mit Photovoltaikanlagen, Entsiegelungen und Renaturierung von Gewässern. So können städtische Gebiete „Gelegenheiten zur signifikanten Senkung der Treibhausgasemissionen schaffen, indem die Kohlenstoffaufnahme und -speicherung in der städtischen Umwelt gestärkt wird, zum Beispiel durch biobasierte Baumaterialien, durchlässige Oberflächen, Gründächer, Bäume, Grünflächen, Flüsse, Teiche und Seen“ (Nabuurs et al. 2022: C.6). Die Verdunstungswirkung von Stadtgrün wirkt den Hitzeinseleffekt urbaner Räume entgegen und ist ein wichtiger Beitrag zur kleinräumigen Klimafolgenanpassung, insbesondere zum Gesundheitsschutz für Ältere und Kleinkinder.

#### 4.6 Aquatische Systeme

Zu den Ökosystemen, die bei nachhaltiger, überwiegend naturnaher Nutzung in der Lage sind, signifikante Mengen an Kohlenstoff zu fixieren, gehören auch aquatische Systeme. Dazu gehören Gewässer und Auen im Süßwasserbereich, und Seegraswiesen und Salzmarschen im marinen. Nähere Ausführungen dazu, sowie zum Konzept des „Blue Carbon“ beschreiben wir im BUND Standpunkt „Ökologischer Klimaschutz“ (BUND 2024).

#### 4.7 Fazit

**Ökologischer Klimaschutz unterstützt aktive ökologische Systeme darin, CO<sub>2</sub> zu binden und den Kohlenstoff in der Vegetation und im Boden für längere Zeiträume zu fixieren. Er kann jedoch auch bei Ausschöpfung aller Potenziale kein Ersatz für die vorrangig notwendige Reduzierung der Emissionen sein. Betrachtet man die Methoden der biogenen Kohlenstofffixierung genauer, stellt man fest, dass deren Gesamtpotenzial im Bereich von 10–20% der derzeitigen jährlichen Emissionen liegt, was etwa dem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen der vergangenen 10–20 Jahre entspricht.**

**Biogene Kohlenstofffixierung ist nicht per se sozial und ökologisch unproblematisch. So ist zum Beispiel bei der Wiederbewaldung, die der BUND unterstützt, die Wahl der geeigneten Baumarten eine Herausforderung, gerade in Zeiten des Klimawandels. Kritischer ist dagegen die Aufforstung zuvor unbewaldeter Flächen, und abzulehnen ist sie, wenn die Aufforstung auf Moor- oder Grünlandstandorten erfolgen soll – diese binden mehr Kohlenstoff als der Wald, und zwar anders als dieser im Boden, also vergleichsweise dauerhaft. Maßnahmen zur biogenen Kohlenstofffixierung bedürfen einer Einzelfallprüfung auf Umwelt- und Sozialverträglichkeit.**

**Ansätze, deren negative Auswirkungen und Risiken heute schon erkennbar sind, oder die hohe energetische Ineffizienz aufweisen, sollten nicht als valides Instrument der Klimapolitik in Betracht gezogen werden.**

**Eine Analyse und Bewertung von Einzelpolitiken enthält der BUND Standpunkt „Ökologischer Klimaschutz“ (BUND 2024).**

# 5. Kontext: Macht und Modelle

## 5.1 Politisch-wirtschaftlicher Kontext

### 5.1.1 Wirtschaftliche Interessen, Machtfragen und „moral hazard“

Eine Fixierung auf technische Lösungen der Klimakrise, wie sie das Geoengineering darstellt, ist nicht nur wegen möglicher Fehlschläge riskant, sondern auch die machtpolitischen, politisch-rechtlichen und politisch-psychologische Risiken dürfen nicht übersehen werden. Das letztere bezeichnet die Gefahr, dass vermeintlich einsetzbare technische Lösungen zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs dazu führen, dass von der Notwendigkeit, zeitnah und global Treibhausgasemissionen auf nahe Null zu reduzieren abgesehen wird, bzw. dies immer weiter aufgeschoben wird (McLaren, 2016; Preston, 2013). Dieses Phänomen, im Englischen als „moral hazard“ bezeichnet, betrifft zwar nicht die Teile der Bevölkerung, welche sich vor dem Hintergrund des drohenden Einsatzes entsprechender Technologien noch stärker für die stringente Reduktion von Treibhausgasen einsetzen (Corner and Pidgeon, 2014), lässt sich jedoch insgesamt nicht verleugnen. Das gilt nicht nur für die USA – auch in Deutschland findet das Versprechen Anklang, die Klimakrise mit Technologien zu lösen, ohne dass die gegenwärtigen Lebens- und Konsumstile sich ändern müssten (Neugebauer 2022).

Die machtpolitische Herausforderung besteht darin, dass interessierte Kreise eben diesen „moral hazard“ nutzen, um Fortschritte der Klimapolitik gezielt zu blockieren. Einflussreiche Akteursgruppen propagieren Geoengineering statt stringenter Klimapolitik, denn jede Verzögerung erlaubt es ihnen, alte Geschäftsmodelle länger beizubehalten und von alten Investitionen länger zu profitieren, während z.B. Suffizienz, langlebige Produkte und nicht-automobile Mobilität wichtige Geschäftsfelder bedrohen. Die propagierte Notwendigkeit von erheblichen Negativemissionen ist eine Folge der Annahme, dass auch nach 2050 noch signifikante Mengen fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl und Gas) eingesetzt werden – gleichzeitig werden die Zielzahlen für massive „Negativemissionen“ genutzt, um die Weiterförderung fossiler Energieträger zu legi-

timieren. So geht auch die ausführliche Behandlung von CCS als Option im IPCC-Abschlussbericht auf den Druck von Staaten zurück, die ihr Öl und Gas weiterhin verkaufen wollen (DE-IPCC 2022b). Der Flugverkehr als wichtige Quelle von Klimagasen ist im Text beschrieben, hat es aber nicht in die Zusammenfassung für Entscheidungsträger geschafft.

Die Öl- und Gasindustrie sieht zusätzlich die Chance, sich neue Geschäftsfelder zu erschließen und vom „Klimaschurken“ zu „Klimahelden“ zu werden, wenn sie ihre finanziellen, personellen und technischen Kapazitäten auf Felder wie CCS ausrichten – ihre Erfahrungen mit dem Transport und Speichern von Gas würden sie dann auf CO<sub>2</sub> und Wasserstoff übertragen (Sovacool 2021). Diese Firmen sind auch daran beteiligt, mit zunehmender Geschwindigkeit Geoengineering-Technologien patentieren zu lassen; Chavez (2015) beschreibt das als Horten von Patenten. Klimaresiliente Entwicklung wird dagegen durch Partizipation gefördert, „wenn Regierungen, die Zivilgesellschaft und der Privatsektor inklusive Entwicklungsentscheidungen treffen, die Risikominderung, Gleichstellung und Gerechtigkeit priorisieren, und wenn Entscheidungsfindungsprozesse, Finanzmittel und Maßnahmen über Regierungsebenen, Sektoren und Zeitrahmen hinweg integriert werden“ (IPCC 2022a: D.2).

### 5.1.2 Politik durch Normung

Wirtschaftsakteure dominieren auch in der Internationalen Normungsorganisation ISO und setzen sich so selbst Verhaltensregeln, die ihren ökonomischen Interessen entsprechen. Die Tatsache, dass zahlreiche hochpolitische Entscheidungen als technische Fragen klassifiziert und an Normungsgremien übertragen werden (häufig auf EU-Ebene) ist eine Privatisierung politischer Entscheidungsgewalt zu Lasten des Allgemeinwohls. So überrascht es nicht, dass der erste der vier Normungsgrundsätze von ISO ist, den Bedürfnissen des Marktes zu entsprechen. Das ist insofern ein politisch-rechtliches Risiko und für die Zukunft des Geoengineerings wie auch für die deutsche Politik von Bedeutung, als ISO-Normen regelmäßig von der

europäischen Normungsorganisation CEN übernommen werden, damit europäisches Recht werden und nationale Behörden binden, bis zur Ebene der Kommunen. Dabei ist der Prozess der Normsetzung undurchsichtig, Entwürfe neuer Normen sind nicht außerhalb der mit ihnen befassten Arbeitsgruppen zugänglich. ISO-Normen existieren bereits u.a. zur Quantifizierung von Treibhausgasemissionen, ihrer Verringerung und ihrer (verstärkten) Entfernung aus der Atmosphäre (ISO 14064-1 und -2), zur Berechnung des Kohlenstoff-Fußabdrucks von Produkten (ISO 14067) oder den Anforderungen an Klimaanpassung für lokale Behörden und Gemeinden (ISO14092). Diese Normen bilden zusammen mit den UNFCCC Berichterstattungspflichten die Grundlage des weltweiten (und umstrittenen) Emissionshandels. Weitere Normen sind vorgeschlagen, umstritten sind insbesondere ISO/WD 14068 Treibhausgasmanagement und verwandte Aktivitäten – Kohlenstoffneutralität (insbesondere die Definition der Kohlenstoffneutralität ist hier kritisch) und ISO/AWI 14082 Management des Strahlungsantriebs und Klimafußabdrücke. Die auf Drängen der Marktteilnehmer eingesetzte Arbeitsgruppe (Subkomitee 7 des Technischen Komitees TC207; dieses ist für Normen zum Treibhausgasmanagement und verwandte Themen wie Klimaanpassung zuständig) hat auf Drängen von US-Unternehmen einen Standard zum Management des Strahlungsantriebs (radiative forcing) und der Kohlenstoffneutralität entworfen, der es ermöglicht hätte, die Freisetzung von Sonnenlicht reflektierenden Emissionen mit den Treibhausgasemissionen zu verrechnen und in den weltweiten Emissionshandel einzubeziehen – und damit die Normungsgrundlage für Solar Radiation Management zu legen, auch wenn die ISO betont dass die Normung von SRM nicht auf der Tagesordnung stünde. Schadstoffemissionen wie Ruß und Schwefel als klima-positiv anzurechnen und damit die Anforderungen an die CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion zu verringern, wie es in dem 2019 bekanntgewordenen Entwurf (<http://jreynolds.org/wp-content/uploads/2019/09/ISO-2019-draft-radiative-forcing-standards.pdf>) vorgesehen war, würde nicht nur

Luftverschmutzer belohnen und den Weg zum SRM ebnen, es würde auch Branchen wie dem Flugverkehr und der Schifffahrt erlauben, ihre Abgase mit ihren CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verrechnen und weniger zu dekarbonisieren (CSSN 2021). Die deutsche Normungsorganisation DIN zeigte sich erheblich besorgt und sah eine Gefahr für die internationalen Klima- und Umweltpolitischen Zielsetzungsprozesse, eine Ablenkung von den Ursachen der Klimakrise, und eine potenzielle Legitimierung von SRM (CSSN 2021). Aufgrund dieses Widerstands und mit Unterstützung aus Frankreich und Kanada, ist der Normentwurf zunächst zur unverbindlichen Richtlinie herabgestuft worden. Die Bemühungen interessierter Kreise in diese Richtung sind aber ungebrochen, und nicht nur die Öffentlichkeit, sondern auch die Regierungen haben keinen Zugang zu Entwürfen und Verhandlungen.

### 5.1.3 Global denken, global handeln

Globales Handeln bedeutet (auch), 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 wie Geoengineering, die über unterschiedliche Formen von Telecoupling alle Regionen der Welt beeinflussen. Auch aus diesem Grund ist der Glaube, ein nur unvollständig verstandenes komplexes System wie das Weltklima durch gezielte Eingriffe in eine geplante Richtung lenken zu können, ohne dass Fehlschläge und Nebenwirkungen die intendierten Erfolge (so sie denn überhaupt eintreten) zunichtemachen, eine gefährliche Fortsetzung der Symptombekämpfung und cartesianischen Mach- und Planbarkeitsvorstellungen.

Statt sich auf teils riskante, teils unrealistische Technologieoptionen zu verlassen, kommt es im nationalen Interesse wie in internationaler Verantwortung 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 CO<sub>2</sub>-Budgets mit all den genannten Risiken kann auch ohne die genannten, ökologisch riskanten Ansätze vermieden werden (DE-IPCC 2022c). Dabei gilt es, den Anfängen zu wehren, denn es gibt derzeit kein System, das Geoengineering-Programme überwachen könnte. Theoretisch wäre es möglich, dass ein Land oder sogar ein einzelner Milliardär mit Raketentechnologie ein solches Projekt im Alleingang startet (Wetter, Ribeiro 2016).

## 5.2 Klimamodelle

Modelle sind ein unverzichtbarer Bestandteil politischer Gestaltung. Wer auch immer ein politisches Ziel verfolgt, muss sich überlegen, wie und mit welchen Mitteln es zu erreichen ist; dazu ist eine Vorstellung von Zuständen und Wirkmechanismen notwendig, ein sogenanntes „mentales Modell“ als vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit. Um andere zu überzeugen und Mehrheiten zu gewinnen wird aus dem Modell eine Erzählung (Storyline, Narrativ) abgeleitet, die beschreibt, wie das Ziel erreicht werden kann. Diese Narrative stellen eine weitere Vereinfachung dar, enthalten aber Normen, Wertvorstellungen und viele qualitative Elemente. In diese Kategorie fallen Horizon Scanning und Foresight, Verfahren um neue, sich gerade erst manifestierende Entwicklungen frühzeitig zu erkennen, in Deutschland im Bundeskanzleramt verortet und in der EU die Aufgabe eines der Vizepräsidenten der Kommission. Natürlich können solche Verfahren nicht alle zukünftigen Entwicklungen vorhersehen, aber Szenarien zu einem möglichen (und dann stattgefundenen) Verlauf einer Pandemie lagen schon lange vor COVID-19 vor. Viele Textpassagen des IPCC-Abschlussberichts fallen ebenfalls in diese Kategorie: wissenschaftsbasierte Darstellungen von

Einflussfaktoren und Trends, ohne diese und ihre Wechselwirkungen immer quantifizieren zu können.

In einem weiteren Vereinfachungsschritt werden aus den Narrativen quantitative Computersimulationen abgeleitet. Diese sehen aufgrund der Zahlenangaben wie präzise Vorhersagen aus, sind aber aufgrund der schrittweisen Vereinfachung (viele komplexe Wechselwirkungen können in den Modellen nicht abgebildet werden) ein realitätsfernes Instrument. Dabei ist die Realitätsferne der Modelle je nach Anwendungsbereich unterschiedlich. Die großen Klimamodelle, die IPCC WG 1 benutzt, beschreiben physikalische Wechselwirkungen und können diese auch abbilden – hier besteht die Herausforderung in der Unvollständigkeit unseres Wissens (weshalb mit fortschreitendem Stand der Forschung auch die Modelle immer größer und immer vollständiger werden). Schwieriger wird es bei Modellen, die die Auswirkungen der Erderwärmung auf Ökosysteme und ihre Leistungen sowie auf die biologische Vielfalt abbilden sollen, denn Lebewesen unterliegen nicht nur den physikalischen Gesetzen der Natur wie Wind und Wolken, sondern durchlaufen auch evolutionäre Entwicklungen, haben Anpassungsstrategien, und zeigen unvorhergesehene Verhaltensstrategien. Im Abschlussbericht von IPCC WG 2, die diese Themen behandelt, kommen deswegen neben den quantitativen Daten auch viele Beschreibungen von Wirkmechanismen vor, die entweder erst unvollständig erforscht (aber deswegen nicht weniger real) sind, oder die eher qualitativ sind. Die politisch relevanten Aussagen beruhen auf all diesen Kenntnissen und sind deshalb besser abgesichert, als bei einem reinen Rückgriff auf Modellierungen der Fall wäre. Vollends unmöglich werden Vorhersagen, wenn es um die Entwicklung vom Menschen gesteuerter Systeme (Staat, Gesellschaft, Wirtschaft) geht. Menschen können sich emotional verhalten, aber auch rational erwartete Entwicklungen analysieren, Sie können das Eintreten von Ereignissen abwarten und sich dann anpassen, aber auch vorher aktiv werden und antizipierend auf künftige Ereignisse reagieren – und sich dabei irren, oder auch nicht. Für die

Entwicklung menschlicher Gesellschaften gibt es nicht eine Prognose die sagt was sein wird, sondern nur eine Vielzahl von Szenarien die beschreiben was sein könnte. Ökonomische Modelle sind aus diesen Gründen, und wegen der Komplexität der von ihnen beschriebenen Objekte, die realitätsfernsten von allen. Deshalb ist es sinnvoll, ökonomische Modelle nicht als „Welterklärungen“ zu verstehen, sondern als Illustrationen von einzelnen Aspekten aus einem Szenario Narrativ, und die Modellergebnisse im Rahmen des Szenarios einzuordnen und zu interpretieren – die sog. „Storyline and Simulation“ oder SAS Methodik hilft die Realitätsnähe zu verbessern (Alcamo 2001). Kombiniert man jedoch Klima-, Impact- und ökonomische Modelle zu Integrated Assessment Modellen (IAMs) und Computable General Equilibrium (CGE) Modellen, dann werden die Schwächen der ökonomischen Bausteine in das Gesamtmodell eingetragen (Ciarli, Savona 2019). Die genutzten Modelle, aber auch die Transparenz der Entscheidungen über ihre Nutzung und Interpretation, sind deshalb auch unter den IPCC Autor\*innen stark umstritten (Dyke et al. 2021; Robertson 2021; Skea et al. 2021).

Bei der Entscheidung über politische Prioritäten und für die Bewertung, was Politik als zumutbar einstuft, stellen die verfügbaren Klimamodelle durch die Schwächen der in ihnen enthaltenen Wirtschaftsmodelle nur begrenzt eine Hilfe dar, auch wenn sich seit dem letzten Bericht deutliche Verbesserungen ergeben haben. Sie sind aber immer noch oft realitätsfern und führen zu falschen Folgerungen (Asefi-Najafabady et al. 2020; Keen 2020). Viele Modelle berechnen ein wirtschaftliches Optimum, vernachlässigen aber den Wert der verlorenen Natur (Agarwala, Coyle 2021) und kritische Nachhaltigkeitsschwellen (Creutzig et al. 2020). Ältere Modelle betrachten erneuerbare Energien als teuer, obwohl diese inzwischen weit billiger sind als fossile Energiebereitstellung (Pihl et al. 2021). Die Reaktion von Wirtschaft und Gesellschaft auf den Klimawandel spielt in den Szenarien eine (begrenzte) Rolle, die aber in den Modellen nicht abgebildet werden kann (Ciarli, Savona 2019). Der Einfluss des Wirt-

schaftswachstums auf das Klima wird nicht problematisiert und Postwachstum oder Degrowth sind auch nicht Gegenstand der Modellierungen, trotz ihrer zentralen Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele von Paris (Alfredsson et al. 2018; Akenji et al. 2021). Die Annahmen über die Mechanismen wie Menschen entscheiden und ihr Verhalten ändern sind realitätsfern (Ivanova et al. 2018; de Boer, Aiking 2021; Heynen 2022) und als alleinige politische Entscheidungsgrundlage ungeeignet (Otto 2020a; Watson et al. 2020). Das zeigt auch die Studie von Otto et al. (2020b), die soziale Dynamiken untersucht hat und fünf für die Klimapolitik entscheidende soziale Kippunkte findet, von denen nur einer in den Modellen abgebildet werden kann. Verantwortliches politisches Entscheiden, und das Ernstnehmen des Primats der Politik erfordern, sich bei der Konzipierung von Strategien und der Auswahl von Instrumenten nicht auf die vorgeblich präzisen, aber realitätsfernen ökonomischen Simulationen zu verlassen, und die Gestaltungsnarrative zur Grundlage von Entscheidungen und der Kommunikation darüber zu nehmen.

Selbst wenn alle diese Probleme gelöst wären, verblieben Probleme, die in der Szenarienkonstruktion begründet liegen, insbesondere die Fixierung auf ökonomische Instrumente (andere sind mit ökonomischen Modellen nur schwer abbildbar), die Vernachlässigung einer sich ändernden Nachfrage und von Suffizienzpolitik (ebenfalls in der Realität vielversprechend und im IPCC Bericht diskutiert, aber in den Modellen nur schwer abbildbar), und die angenommene Form der Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Bepreisung als wichtigstes untersuchtes Instrument. So haben Strefler et al. (2021) gezeigt, dass wenn man die Standardannahmen der Modellierer, ein niedriger Einstiegspreis, der sich schrittweise erhöht, durch einen hohen und dann gleichbleibenden Preis ersetzt, dieselben Modelle (mit all ihren genannten Schwächen) zu einer Emissionsreduktion kommen, die es erlaubt die Pariser Klimaziele ohne Overshoot, Solarstrahlungsmanagement und negative Emissionen einzuhalten. Der Future Earth Bericht über neue

Erkenntnisse der Klimaforschung 2021 bestätigt diese Analyse, weist aber auch auf die Notwendigkeit hin, Änderungen der Konsummuster als Klimaschutzkomponente angemessen zu berücksichtigen – woran bisher fast alle Modelle scheitern (Martin et al. 2021). Auch in der Wissenschaft, und insbesondere in den Wirtschaftswissenschaften erfordert die Klimakrise neues Denken.

Statt Reparaturtechnologien zu entwickeln müssen die Anforderungen z. B. des Vorsorgeprinzips, Schäden in einem vernünftigen Maß zu vermeiden, durchgehend und politikübergreifend beachtet und in den Szenario-Narrativen abgebildet werden. Es geht dabei nicht schlicht darum, per ökonomischer Modellierung positive gegen negative Effekte abzuwägen oder ökonomische Kosten-Nutzen-Analysen anzustellen, sondern vielmehr müssen diskursiv, partizipativ und wissenschaftsbasiert mögliche Risiken identifiziert und gegen die alternativer Handlungspfade – wie eine konsequente Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch geänderte Lebens- und Wirtschaftsweisen – unter ökologischen, sozialen und ökonomischen Aspekten abgewogen werden. Tut man das, so erweisen sich die großräumigen Methoden des Geoengineerings als unwirksam, riskant und teuer. Diese Einsicht ist die Grundlage der Forderungen des BUND.

# 6. Forderungen des BUND

## 6.1 Kernforderungen

### 1. Die Begrenzung der Erderhitzung auf 1,5 Grad ist unbedingt nötig

**Der BUND fordert von der Bundesregierung einen konsequenten Klimaschutz, der zur Einhaltung des Treibhausbudgets ohne Overshoot führt, wie vom Verfassungsgericht verlangt.**

Szenarien mit Overshoot sind keinesfalls gleichrangig zu Szenarien, die das Treibhausbudget einhalten, sondern akzeptieren unverantwortbare Risiken für Ökosysteme und die biologische Vielfalt durch die Abfolge von Temperaturanstieg und anschließender Rückführung, einschließlich irreversibler Schäden. Sie sind keine geeignete Grundlage für eine verantwortbare Klimapolitik, denn jedes Zehntelgrad verstärkt die Schäden deutlich, und macht einige davon unumkehrbar. Zudem erhöht sich die Wahrscheinlichkeit von Schocks, Kippunkte und –kaskaden oberhalb von 1,5 °C Erwärmung deutlich.

### 2. Echte Treibhausgasminderung statt Geoengineering

**Geoengineering und „negative Emissionen“ ersetzen keine Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen – beim derzeitigen Niveau der Emissionen sind sie von vernachlässigbarer Wirkung. Alle beschriebenen Techniken zur Erzeugung von „negativen Emissionen“ sind zudem für die großflächige Anwendung ungetestet, nicht sicher skalierbar, hoch energieintensiv, und mit ökologischen Folgeschäden verbunden, potenziell verheerend für Biodiversität, Ökosysteme und ihre Leistungen.**

Wir fordern die Bundesregierung auf, nicht alles auf eine Karte zu setzen, und sich aus wirtschaftlichen und sozialen wie aus Umweltgründen nicht auf die technische Abscheidung von CO<sub>2</sub> und seine sichere Endlagerung als Grundlage zukünftigen Wirtschaftens zu verlassen.

Es gibt keinen Ersatz für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Biomassenutzung ist weder

klimaneutral, noch ist Biomasse als Substitut ohne massive Zerstörungen von Ökosystemen und biologischer Vielfalt in signifikanten Mengen verfügbar. „Negative Emissionen“ wie Maßnahmen zur Meeresalkalinisierung und zur Düngung der Ozeane lehnt der BUND ebenso ab wie CCS, die Einbringung von Pyrolysekohle in die Böden, und den großflächigen Anbau von Pflanzen zur Biomasseproduktion zur Energiegewinnung.

Die Bundesregierung muss sich dafür einsetzen, 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) fortzusetzen und dagegen verstoßende Experimente und Forschungsvorhaben unter finanzieller, institutioneller oder personeller deutscher Beteiligung zu unterbinden. Im multilateralen Kontext, insbesondere im Rahmen des Globalen Biodiversitätsübereinkommens (GBF), soll sie sich für den Erhalt und die Wiederherstellung eines naturnahen ökologischen und chemischen Zustands der Weltmeere einsetzen.

### 3. Radiation Management verbieten und weltweit ächten

**Die Risiken des Radiation Management sind hoch, der Nutzen begrenzt und die Machbarkeit unsicher. Wir fordern von der Bundesregierung ein Ende jeglicher Forschungsförderung und Initiativen für ein umfassendes völkerrechtliches Verbot.**

Alle Formen des Solar Radiation Management bekämpfen nur eine (wichtige) von zahlreichen Folgen der steigenden Treibhausgasemissionen und adressieren nicht die Ursachen. Sie sind deswegen weder zielführend noch verantwortlich machbar, auch weil es derzeit kein System gibt, weder auf UN-Ebene noch in anderen internationalen Rahmen, das Geoengineering-Programme wirksam überwachen könnte. Der Versuch durch SRM die Überhitzung zwischenzeitlich (bis zur erhofften Abkühlung durch „negative Emissionen“) oder auf

Dauer (als Ersatzmaßnahme) zu begrenzen, ist zudem mit besonders hohen und zum Teil noch unverstandenen Risiken behaftet, und damit keine ökologisch wie politisch verantwortbare Position. Wir unterstützen deshalb die Forderung nach einem internationalen Abkommen über den Verzicht auf solche Projekte, das auch die Finanzierung von Geoengineering-Experimenten untersagt und Patente für solche Technologien verbietet (Biermann et al. 2022) und fordern die Bundesregierung auf, Initiativen zu ergreifen, die das Verbot von SRM über die gegenwärtigen Einschränkungen hinaus umfassend völkerrechtlich festschreiben und kurzfristig Maßnahmen zu ergreifen, dies national umzusetzen.

**4. Natürlichen Klimaschutz fördern – aber richtig**  
**Biogene Kohlenstofffixierung kann eine Win-Win-Lösung für Klimaschutz und biologische Vielfalt sein. Schöpft man die nachhaltigen Potenziale aus und reduziert man den Energieverbrauch um die Hälfte, reicht der natürliche Klimaschutz aus, um die unvermeidlichen Restemissionen zu absorbieren. Der BUND fordert eine verstärkte Förderung von ökologischem Land- und Waldbau, Wiederbewaldung mit standortgemäßen Baumarten, Moorschutz und Wiedervernässung trockengelegter Moore wo immer möglich, und die Revitalisierung degradierter Böden.**

Die Revitalisierung degradierter Böden kann zur terrestrischen CO<sub>2</sub>-Speicherung beitragen und wird vom BUND begrüßt. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass nicht die Speicherung andere Ziele des Bodenschutzes dominiert, sondern durch Maßnahmen wie ökologischen Landbau, Agroforstwirtschaft und eine naturschützende Forstwirtschaft Klima-, Boden- und Biodiversitätsschutz integriert gefördert werden. Das erfordert eine ökologische Wende der Agrarpolitik (einschließlich der Tierhaltung, BUND 2022a).

Biogene Kohlenstofffixierung muss man also richtig gestalten; sie ist nicht per se sozial und ökolo-

gisch unproblematisch. So ist zum Beispiel bei der Wiederbewaldung, die der BUND unterstützt, die Wahl der geeigneten Baumarten eine Herausforderung, gerade in Zeiten des Klimawandels. Kritischer ist dagegen die Aufforstung zuvor unbewaldeter Flächen, und abzulehnen ist sie, wenn die Aufforstung auf Moor- oder Grünlandstandorten erfolgen soll – diese binden mehr Kohlenstoff als der Wald, und zwar anders als dieser im Boden, also vergleichsweise dauerhaft. Maßnahmen zur biogenen Kohlenstofffixierung bedürfen einer Einzelfallprüfung auf Umwelt- und Sozialverträglichkeit.

**5. Politische Verantwortung heißt weiter denken als die Modelle tragen**

**Die vom IPCC ausgewerteten ökonomischen Modelle reichen als Basis für Politikentscheidungen nicht aus. Wichtig ist es Aspekte wie Konsumwandel, Suffizienz(politik), Regulierung jenseits ökonomischer Instrumente und gesellschaftliche Transformationsprozesse jenseits ökonomischer Wirkmechanismen, nachhaltig verfügbare Ressourcen, insbesondere Biomasse, die Folgen einer Postwachstumsentwicklung und die Finanzierung von Gemeingütern (Klimaanpassung, Reparatur von Klimafolgeschäden und Ökosystemdegradierungen, aber auch Gesundheitsschutz und soziale wie externe Sicherheit) auch unter Postwachstumsbedingungen mit in die Szenario-Narrative aufzunehmen, auch wenn diese in den gängigen Modellen nicht abgebildet werden können. Entscheidungsgrundlage müssen dann die Narrative sein („harte Fakten“), und nicht die Berechnungen der Modelle („weiche Zahlen“).**

All dies ist nicht allein eine politische und naturwissenschaftliche Kontroverse, sondern beruht auch auf rechtlichen Vorgaben. Die 1,5-Grad-Grenze aus Artikel 2 des Pariser Klima-Abkommens ist rechtsverbindlich, und ein Overshoot ist mit ihr nicht vereinbar, wie auch in der u.a. vom BUND erstrittenen bahnbrechenden Klima-Entscheidung des Bundesverfassungsgerichts vom Frühjahr 2021

anklingt. Und die 1,5-Grad-Grenze wie auch parallel laufende (mit dem Bundesverfassungsgericht vorsorgeorientiert verstandene) Menschenrechte erzwingen nicht nur einen Vorrang der Mitigation vor möglichen Kompensationen, und sie erzwingen einen Vorrang etablierter Kompensationen im Moor- oder Forst-Management vor hochriskanten Geoengineering-Ansätzen (zum Ganzen Wieding et al. 2020; Ekaradt et al. 2022).

## 6.2 Details und Erläuterungen

### Zu 1: Die Begrenzung der Erderhitzung auf 1,5 Grad ist unbedingt nötig

Bei Überschreiten der Kippunkte verselbständigen sich die Prozesse und können durch menschliche Eingriffe kaum noch gestoppt werden. Dazu zählen z.B. das Abschmelzen der Eisschilde und der Meeressiegelanstieg, der Kollaps des Golfstroms und des Zirkulationssystem, dessen bekanntester Teil er ist, oder die Versteppung der tropischen Regenwälder – alles Prozesse, die die Wasser- und Nahrungsmittelversorgung der Menschheit in Frage stellen. Besonders beunruhigend ist dabei, dass nicht nur die unmittelbar mit einem Kippunkt zusammenhängenden Folgen ausgelöst werden können, sondern die Gefahr von Domino-Effekten besteht; bekannt ist, dass die Wechselwirkungen zwischen den Kippelementen dazu neigen, das gesamte Netzwerk zu destabilisieren.

Auch ohne Schocks wäre der zweimalige Anpassungsprozess verheerend für Naturschutz, biologische Vielfalt, Ökosysteme und ihre Leistungen. Dazu ist die Energieeinsparung mit rechtlichen und ökonomischen Instrumenten verstärkt voranzutreiben und das Ziel einer Reduktion des Primärenergieverbrauchs in Deutschland um 50% bis zur Mitte des Jahrhunderts (Bundesregierung 2019) umzusetzen.

### Zu 2: Echte Treibhausgasminde rung statt Geoengineering

Aufgrund des Vorgesagten fordert der BUND im Handlungsfeld „negative Emissionen“

- Die Bundesregierung muss sich dafür einsetzen,

dass 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) fortzusetzen und dagegen verstoßende Experimente und Forschungsvorhaben unter finanzieller, institutioneller oder personeller deutscher Beteiligung zu unterbinden. Im multilateralen Kontext, insbesondere im Rahmen des Globalen Biodiversitätsübereinkommens (GBF), soll sie sich für den Erhalt und die Wiederherstellung eines naturnahen ökologischen und chemischen Zustands der Weltmeere einsetzen.

- Maßnahmen zur Meeresalkalinisierung sind weder eine wirksame Maßnahme gegen die ubiquitäre Versauerung Meere, noch sind signifikante „negative Emissionen“ zu erwarten. Dem gegenüber stehen hoher Energieverbrauch, signifikante Stoffströme und die Zerstörung oft wertvoller Habitatflächen. Deshalb sollten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diese Richtung nicht gefördert und die Gesteinsverklappung in deutschen Hoheitsgewässern bzw. der marinen Wirtschaftszone verboten werden. Die Bundesregierung muss sich für das Verbot von Geoengineering auch in internationalen Gewässern, in bestehenden und im Zuge der Umsetzung des Globalen Biodiversitätsübereinkommens neu zu gründenden Meeresschutzgebieten weltweit einsetzen und den Schutz durch Versauerung bedrohter Ökosysteme mittels Forschung vorantreiben.
- Direkte CCS ist noch mehr als CCS an Industrieanlagen ein energieintensiver Prozess, der den Gesamtenergieverbrauch der Bundesrepublik massiv steigern und so Energieeinsparung, Effizienz und Energiewende ad absurdum führen würde. Das gilt unverändert, wenn das Brennmaterial aus Biomasse besteht, deren Bereitstellung zudem zu erheblichen Schäden für die biologische Vielfalt führen (und der Bioökonomie die Rohstoffgrundlage entziehen) würde. Deshalb sind Förderprogramme für alle Varianten von CCS eine ökologisch unverantwortliche Verschwendung öffentlicher Mittel und sollten eingestellt werden.

- Bei allen Verfahren zur Herstellung von Pyrolysekohle ist die Bildung organischer Schadstoffe möglich. Insbesondere handelt es sich hierbei um polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), die prozessbedingt entstehen. Da nicht sichergestellt werden kann, dass die gebundenen Schadstoffe im Verlauf von Abbauprozessen der Kohle nicht freigesetzt werden, ist auch hier das Vorsorgeprinzip konsequent anzuwenden. Danach sollen Produkte, die Schadstoffe abgeben können, nicht in die Umwelt eingebracht werden.
- Die Gewinnung von biobasierten Ersatztreibstoffen ist ein Prozess, in dem viel Fläche für einen geringen Energieüberschuss in Anspruch genommen wird, mit bereits deutlichen Folgen für die biologische Vielfalt. Wird dieselbe Fläche zur Energiegewinnung durch Fotovoltaik genutzt, sind die Erträge um mehr als eine Größenordnung höher (BUND 2022b). Der BUND fordert deshalb, die Beimischungsvorschriften und Subventionen der EU ersatzlos zu beenden. Zudem ist das Primat der Nahrungsmittelerzeugung bisher eine politische Position, die rechtlich kaum durchsetzbar ist – das muss geändert werden, wenn sich die Bioökonomie weiter ausbreitet.

### **Zu 3: Radiation Management verbieten und weltweit ächten**

Solar Radiation Management/Solar Geoengineering halten wir aus den genannten Gründen weder für zielführend noch für verantwortlich machbar, auch weil es derzeit kein System gibt, weder auf UN-Ebene noch in anderen internationalen Rahmensetzungen, das Geoengineering-Programme wirksam überwachen könnte. Wir unterstützen deshalb die Forderung nach einem internationalen Abkommen über den Verzicht auf solche Projekte, das auch die Finanzierung von Geoengineering-Experimenten untersagt und Patente für solche Technologien verbietet (Biermann et al. 2022).

Für das Handlungsfeld Solar Radiation Management fordert der BUND

- Der BUND fordert die Bundesregierung ist auf, keine Vorhaben zu fördern, die der Vorbereitung derartiger Eingriffe dienen, und international Initiativen zu ergreifen, die das Verbot von SRM über die gegenwärtigen Einschränkungen hinaus umfassend völkerrechtlich festschreiben.
- ein völkerrechtliches Verbot durchzusetzen und zu verhindern, dass es nicht von Wissenschaftler\*innen oder privaten Akteuren unterlaufen wird. Dazu ist eine internationale Monitoring-Institution notwendig, die auch über Sanktionsmöglichkeiten verfügt.
- bestehende bzw. geplante Forschungsvorhaben zu regulieren, da auch durch diese nicht ausgeschlossen ist, dass bereits gegen das Vorsorgeprinzip verstoßen wird und Menschenrechte verletzt werden
- die Schaffung von Transparenz zur Forschung an Geoengineering-Projekten, sowie zur Folgenabschätzungen und Haftung unter einer breiten Öffentlichkeitsbeteiligung und internationaler Kooperation an der Entscheidungsfindung bezüglich bestimmter Geoengineering-Techniken
- längerfristig fordern wir eine völkerrechtlich bindenden Konvention zum Verbot von Geoengineering und die Schaffung einer Überwachungsorganisation, die die Einhaltung einer solche Konvention auch durchsetzen und Verstöße sanktionieren kann.

### **Zu 4: Natürlichen Klimaschutz fördern – aber richtig**

Wie ausgeführt sieht der BUND Potenziale zur Reduzierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen da, wo es um in ökologische Zusammenhänge eingebettete Naturprozesse geht, also insbesondere bei der Restitution degradierter Umweltsysteme durch Wiederbewaldung, Wiedervernässung ehemaliger Moorgebiete und Wiederanreicherung von Kohlenstoff im Boden durch Humusbildung. In allen drei Bereichen geht es darum, bereits eingetretene Schäden für Klima, Böden und Biodiversität wieder rückgängig zu machen. Als erste Schritt in diesen Feldern, betont der wissenschaftliche Beirat der Europäischen Akademien, muss aber der Zustand geändert werden, dass

heute diese potenziellen Kohlenstoffsenken durch nicht nachhaltige Bewirtschaftung hoch relevante CO<sub>2</sub>-Quellen sind – das ist bisher weder auf nationaler noch auf EU-Ebene der Fall. Zudem sind die Potenziale begrenzt und stellen keinen Ersatz für unzulängliche Emissionsreduzierungen dar (EASAC 2018). Die IPCC-Szenarien mit ihrem fortgeschrieben hohen Einsatz fossiler Energieträger sind auch deshalb keine geeignete Entscheidungsgrundlage für eine zukunftsfähige Klima- und Biodiversitätspolitik. Von Vorteil ist, dass Aufforstung, naturnähere Bewirtschaftung der Wälder und Kohlenstofffixierung durch Bodenverbesserung, insbesondere durch Humusanreicherung, im Gegensatz zu fast allen anderen Geoengineering-Technologien bereits heute einsatzbereit verfügbar sind (National Academies 2019).

- Während der Schutz von Primärwäldern und die Wiederbewaldung zerstörter oder degradierter Waldflächen mit vorwiegend heimischen Baumarten in naturnahem Waldbau vom BUND unterstützt werden, betrachten wir die Aufforstung als ambivalent. Mit lokal adaptierten Baumarten und naturnaher Bewirtschaftung (einschließlich Totholzverbleib im Wald) können ggf. längerfristig Klima- und Biodiversitätsziele erreicht werden. Insbesondere die (Re-)Konstruktion von Naturräumen, z.B. durch ihre die Wiederbewaldung, sollte daher die primäre Option sein, da hiermit auch die Biodiversität und viele Naturfunktionen, von Grundwasserbildung bis hin zu Erholungsfunktionen, gesichert werden können. Eine solche naturnahe Bewirtschaftung sollte auf allen Flächen im Besitz der öffentlichen Hand verbindlich sein, und privaten Waldbesitzern empfohlen werden. Unterstützungszahlungen darf es nur noch für Waldschäden an naturnahen Wäldern geben.
- Dagegen können beim Anbau schnellwachsender Baumarten, verkürzten Rotationszeiten und Restholznutzung zwar wirtschaftliche Vorteile erzielt werden, aber die Klimaschutzwirkung ist gering und die Folgen für die biologische Vielfalt negativ. Dieser Formen der Aufforstung lehnt der BUND ab.

### **Zu 5: Politische Verantwortung heißt weiter denken als die Modelle tragen**

Die wichtigste neue Einsicht im 6. IPCC-Bericht ist, dass „der Schutz der biologischen Vielfalt und von Ökosystemen von grundlegender Bedeutung für eine klimaresiliente Entwicklung angesichts der Bedrohungen, die der Klimawandel für sie darstellt, und ihrer Rolle für Anpassung und Minderung [...]“. Aktuelle Analysen, die sich auf Belege aus ganz unterschiedlichen Untersuchungsansätzen stützen, legen nahe, dass die Erhaltung der Resilienz von biologischer Vielfalt und Ökosystemleistungen auf globaler Ebene vom wirksamen und gerechten Schutz von etwa 30 bis 50% der Land-, Süßwasser- und Meeresflächen der Erde abhängt, einschließlich von derzeit naturnahen Ökosystemen“ (IPCC 222a: D.4). Das entspricht auch den Zielen, die im November 2022 bei der Tagung der UN-Biodiversitätskonvention in Montreal beschlossen wurden und die im Globalen Biodiversitätsübereinkommens (GBF) festgelegt sind, sowie auch den Forderungen des BUND.

# 7. Literaturverzeichnis

- Zitate aus den Summaries for Policy Makers des 2021/22 AR 6 Report des IPCC sind durch die Quelle, plus hinter einem Doppelpunkt der Nummer der These im betreffenden Bericht auffindbar.
- Abatayo, A. L., Bosetti, V., Casari, M., Ghidoni, R., Tavoni, M. 2020. Solar geoengineering may lead to excessive cooling and high strategic uncertainty. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(24): 13393.
- Agarwala, M., Coyle, D. 2021. Natural capital in climate models. *Nature Sustainability* 4(2): 81-82.
- Ahlm, L., Jones, A., Stjern, C.W., Muri, H., Kravitz, B., Kristjansson, J.E., 2017. Marine cloud brightening – as effective without clouds. *Atmospheric Chem. Phys. Online* 17. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13071-2017>.
- Akenji, L., Bengtsson, M., Toivio, V., Lettenmeier, M., Fawcett, T., Parag, Y., Saheb, Y., Coote, A., Spangenberg, J. H., Capstick, S., Gore, T., Coscieme, L., Wackernagel, M., Kenner, D. 2021. 1.5-Degree Lifestyles: Towards A Fair Consumption Space for All. Hot or Cool Institute, Berlin.
- Albright, R., Caldeira, L., Hosfelt, J., Kwiatkowski, L., Maclaren, J. K., Mason, B. M., Nebuchina, Y., Ninokawa, A., Pongratz, J., Ricke, K. L., et al. 2016. Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification. *Nature* 531(7594): 362-365.
- Alcamo, J. 2001. Scenarios as tools for international environmental assessments. EEA Expert Corner Report Prospects and Scenarios No. 5. EEA European Environment Agency, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- 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. <https://doi.org/10.1080/15487733.2018.1458815>
- Alterskjær, K., Kristjánsson, J.E., Boucher, O., Muri, H., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., Timmreck, C., 2013. Sea-salt injections into the low-latitude marine boundary layer: The transient response in three Earth system models. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 118, 12,195-12,206. <https://doi.org/10.1002/2013JD020432>
- Angel, R., 2006. Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1). *Proc. Natl. Acad. Sci.* 103, 17184. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608163103>
- Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., Lenton, T. M. 2022. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science* 377(6611): eabn7950. <https://doi.org/10.1126/science.abn7950>
- Asefi-Najafabady, S., Villegas-Ortiz, L., Morgan, J. 2020. The failure of Integrated Assessment Models as a response to 'climate emergency' and ecological breakdown: the Emperor has no clothes. *Globalizations*: 1-11.
- 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.
- Bach, L. T., Tamsitt, V., Gower, J., Hurd, C. L., Raven, J. A., Boyd, P. W. 2021. Testing the climate intervention potential of ocean afforestation using the Great Atlantic Sargassum Belt. *Nature Communications* 12(1): 2556.
- Bahn, O., Chesney, M., Gheysens, J., Knutti, R., Pana, A.C., 2015. Is there room for geoengineering in the optimal climate policy mix? *Environ. Sci. Policy* 48, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.014>
- Bakker, D.C.E., Watson, A.J., Law, C.S. 2001. Southern Ocean iron enrichment promotes inorganic carbon drawdown. *Deep Sea Res., Part II: Topical Studies in Oceanography* 48: 2483-2507.
- Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Méndez Turrubiates, R. F., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M., Achebak, H. 2023. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nature Medicine*. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z>
- Barrett, S., 2008. The incredible economics of geoengineering. *Environ. Resour. Econ.* 39, 45-54.
- 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.
- Baughman, E., Gnanadesikan, A., Degaetano, A., Adcroft, A., 2012. Investigation of the Surface and Circulation Impacts of Cloud-Brightening Geoengineering. *J. Clim.* 25, 7527-7543. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00282.1>
- Baum, C. M., Low, S., Sovacool, B. K. 2022. Between the sun and us: Expert perceptions on the innovation, policy, and deep uncertainties of space-based solar geoengineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158: 112179.
- Biermann, F., Möller, I., 2019. Rich man's solution? Climate engineering discourses and the marginalization of the Global South. *Int. Environ. Agreem. Polit. Law Econ.* 19, 151-167. <https://doi.org/10.1007/s10784-019-09431-0>

- Biermann, F., Oomen, J., Gupta, A., Ali, S. H., Conca, K., Hajer, M. A., Kashwan, P., Kotzé, L. J., Leach, M., Messner, D., et al. 2022. Solar geoengineering: The case for an international non-use agreement. *WIREs Climate Change* n/a(n/a): e754.
- BIOACID – Biologische Auswirkungen von Ozeanversauerung (Biological Impacts of Ocean Acidification): Ozeane im Klimawandel; <https://www.oceanacidification.de/einfuehrung/>; abgerufen 23.06.2019
- de Boer, J., Aiking, H. 2021. Climate change and species decline: Distinct sources of European consumer concern supporting more sustainable diets. *Ecological Economics* 188: 107141. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107141>
- Boers, N. 2021. Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change* 11(8): 680-688.
- Boers, N., Rypdal, M. 2021. Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 118(21): e2024192118.
- Boulton, C. A., Lenton, T. M., Boers, N. 2022. Pronounced loss of Amazon rainforest resilience since the early 2000s. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>
- Branch, O., Wulfmeyer, V. 2019. Deliberate enhancement of rainfall using desert plantations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(38): 18841-18847.
- Brasseur, G.P., Roeckner, E., 2005. Impact of improved air quality on the future evolution of climate. *Geophys. Res. Lett.* 32. <https://doi.org/10.1029/2005GL023902>
- 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.
- Bromley, B. C., Khan, S. H., Kenyon, S. J. 2023. Dust as a solar shield. *PLOS Climate* 2(2): e0000133.
- 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.
- Buck, H. J., Carton, W., Lund, J. F., Markusson, N. 2023. Why residual emissions matter right now. *Nature Climate Change* 13(4): 351-358. [10.1038/s41558-022-01592-2](https://doi.org/10.1038/s41558-022-01592-2).
- BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2017. Konzept für eine zukunftsfähige Energieversorgung. BUND Position 66. [Purper, G., Neumann, W., Mitglieder des BUND Bundesarbeitskreises Energie]. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin.
- BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2022a. Zukunftsfähige Landwirtschaft – umweltverträglich, tiergerecht und sozial: BUND Position 73. [König, S., Uhlenhaut, T., BUND Bundesarbeitskreis Landwirtschaft]. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin
- BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2022b. Naturverträgliche Freiflächen-Solaranlagen für Strom und Wärme. BUND Position 72. [Neumann, W., Frobel, K. Mitglieder der BUND Bundesarbeitskreise Energie und Naturschutz]. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin.
- BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2023. BUND-Standpunkt CCS (Carbon Capture and Storage): Falsche Weichenstellung verhindern! Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Berlin.
- Bundesregierung 2019. Energieeffizienzstrategie 2050. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin.
- Calabrese, S., Wild, B., Bertagni, M. B., Bourg, I. C., White, C., Aburto, F., Cipolla, G., Noto, L. V., Porporato, A. 2022. Nano- to Global-Scale Uncertainties in Terrestrial Enhanced Weathering. *Environmental Science & Technology* 56(22): 15261-15272.
- Chavez, A. E. 2015. Exclusive rights to saving the planet: the patenting of geoengineering inventions. *J. Tech. Intell. Prop.* 1. <https://scholarlycommons.law.northwestern.edu/njtip/vol13/iss1/1>
- Chirinda, N., Arenas, L., Katto, M., Loaiza, S., Correa, F., Isthiani, 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., et al. 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).
- Ciarli, T. and M. Savona 2019. Modelling the Evolution of Economic Structure and Climate Change: A Review. *Ecological Economics* 158: 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.008>
- Climate Action Network Europe, 2019. Position on Solar Radiation Modification (SRM). CAN, Brussels.
- Corner, A., Pidgeon, N., 2014. Geoengineering, climate change scepticism and the 'moral hazard' argument: an experimental study of UK public perceptions. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 372, 20140063. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0063>.
- Cornwall, W. 2017. The burning question. *Science* 355(6329): 18-21.

- Creutzig, F., Erb, K.-H., Haberl, H., Hof, C., Hunsberger, C., Roe, S. 2020. Considering sustainability thresholds for BECCS in IPCC and biodiversity assessments. *GCB Bioenergy*. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12798>
- Crutzen, P.J., 2006. Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma? *Clim. Change* 77, 211. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9101-y>.
- CSSN Climate Social Science Network. 2021. Potential obstruction of climate change mitigation through ISO standard on radiative forcing management. CSSN Position Paper 2021:1. <https://www.cssn.org/potential-obstruction-of-climate-change-mitigation-through-iso-standard-on-radiative-forcing-management/>
- Cziczo, D.J., Froyd, K.D., Hoose, C., Jensen, E.J., Diao, M., Zondlo, M.A., Smith, J.B., Twohy, C.H., Murphy, D.M., 2013. Clarifying the Dominant Sources and Mechanisms of Cirrus Cloud Formation. *Science* 340, 1320. <https://doi.org/10.1126/science.1234145>
- Davidson, P., Burgoyne, C., Hunt, H., Causier, M., 2012. Lifting options for stratospheric aerosol geoengineering: advantages of tethered balloon systems. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 370, 4263–4300. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0639>
- de Rigo, Daniele, Giorgio Libertà, Tracy Durrant, Tomas Artes, and J. San-Miguel-Ayanz. 2017. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty. <https://doi.org/10.2760/13180>
- 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.
- DE-IPCC Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. 2022a. Beitrag aus der Arbeitsgruppe 1 „Naturwissenschaftliche Grundlagen“ bei der DE-IPCC-Diskussionsveranstaltung zum Sechsten IPCC Sachstandsbericht von Auswärtigem Amt und Bundesministerium für Bildung und Forschung, 28. April 2022.
- DE-IPCC Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. 2022b. Beitrag aus der Arbeitsgruppe 2 „Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit“ bei der DE-IPCC-Diskussionsveranstaltung zum Sechsten IPCC Sachstandsbericht von Auswärtigem Amt und Bundesministerium für Bildung und Forschung, 28. April 2022.
- DE-IPCC Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle. 2022c. Beitrag aus der Arbeitsgruppe 3 „Minderung des Klimawandels“ bei der DE-IPCC-Diskussionsveranstaltung zum Sechsten IPCC Sachstandsbericht von Auswärtigem Amt und Bundesministerium für Bildung und Forschung, 28. April 2022.
- DFG 2018. Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte. Informationen aus dem Schwerpunktprogramm 1689 der Deutschen Forschungsgemeinschaft. <https://www.spp-climate-engineering.de/index.php/aktuelles.html>
- Doughty, C. E., Field, C. B. & McMillan, A. M. S. 2011. Can crop albedo be increased through the modification of leaf trichomes and could this cool regional climate? *Clim. Chang.* 104, 379–387.
- Dyke, J., Watson, R.Knorr, W. (2021). Climate scientists: concept of net zero is a dangerous trap. *The Conversation* 2021(April 22nd).
- Early, J.T., 1989. Space-based solar shield to offset greenhouse effect. *J. Br. Interplanet. Soc.* 42, 567–569.
- EASAC European Academies' Scientific Advisory Council. 2018. Negative Emission technologies: What role in meeting the Paris Agreement targets? EASAC policy report 35, Halle/Saale, Germany, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina.
- 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.
- Englisch, M. 2007. Ökologische Grenzen der Biomassennutzung in Wäldern. *BWF-Praxisinformationen* 13: 8–10.
- 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.
- Ekardt, F., Bärenwaldt, M., Heyl, K. 2022. The Paris Target, Human Rights, and IPCC Weaknesses: Legal Arguments in Favour of Smaller Carbon Budgets. *Environments* 9(9):112. <https://doi.org/10.3390/environments9090112>
- 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 Comission on Genetic Resources for Food and Agriculture, Rome.
- Fatueuer, T. 2014. Eine neue Ökonomie der Natur. *Ökologisches Wirtschaften* 29(2): 19–21.

- Feldmann, J., Levermann, A., Mengel, M., 2019. Stabilizing the West Antarctic Ice Sheet by surface mass deposition. *Sci. Adv.* 5, eaaw4132. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw4132>
- Feng, E. Y., Keller, D. P., Koeve, W., Oschlies, A. 2016 Could artificial ocean alkalization protect tropical coral ecosystems from ocean acidification? *Environmental Research Letters* 11(7): 11 074008.
- Ferraro, A.J., Griffiths, H.G., 2016. Quantifying the temperature-independent effect of stratospheric aerosol geoengineering on global-mean precipitation in a multi-model ensemble. *Environ. Res. Lett.* 11, 034012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034012>
- Field, L., Ivanova, D., Bhattacharyya, S., Mlaker, V., Sholtz, A., Decca, R., Manzara, A., Johnson, D., Christodoulou, E., Walter, P., Katuri, K., 2018. Increasing Arctic Sea Ice Albedo Using Localized Reversible Geoengineering. *Earths Future* 6, 882–901. <https://doi.org/10.1029/2018EF000820>.
- 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](https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf)
- Flückinger, W., Braun, S. 2009. Nährstoffe im Wald lassen – oder recyklieren! *Wald und Holz* 9/09: 30 – 33.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Pet al. 2022. Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data* 14(11): 4811–4900.
- Fuss, S., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., et al. 2018. Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. *Environmental Research Letters* 13(6): 063002.
- Gaskill, A., 2014. Summary of Meeting with U.S. DOE to Discuss Geoengineering Options to Prevent Abrupt and Long-Term Climate Change. North Carolina, USA.
- Gasparini, B., Lohmann, U., 2016. Why cirrus cloud seeding cannot substantially cool the planet. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 4877–4893. <https://doi.org/10.1002/2015JD024666>
- Gasparini, B., McGraw, Z., Storelvmo, T., Lohmann, U., 2020. To what extent can cirrus cloud seeding counteract global warming? *Environ. Res. Lett.* 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab71a3>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., et al. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature* 595(7867): 388–393.
- Geoengineering Monitor, 2021a. Veränderung der Oberflächenalbedo. *Geoengineering Technologie-Briefing* aktualisiert Januar 2021. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, Germany.
- Geoengineering Monitor, 2021b. Geoengineering Technologie-Briefing. Aktualisiert im Januar 2021. Ausdünnung von Zirruswolken. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin, Germany.
- Georgescu, M., Morefield, P.E., Bierwagen, B.G., Weaver, C.P., 2014. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 201322280. <https://doi.org/10.1073/pnas.1322280111>
- 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., Niedertscheider, M., Pichler, M., Schafartzik, 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/publications-reports-research/global-status-of-ccs-report-2018/>
- Golja, C.M., Chew, L.W., Dykema, J.A., Keith, D.W., 2021. Aerosol Dynamics in the Near Field of the SCoPEX Stratospheric Balloon Experiment. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 126, e2020JD033438. <https://doi.org/10.1029/2020JD033438>
- Goudi, A., Middleton, N.J., 2006. *Desert Dust in the Global System*. Springer Berlin Heidelberg, Germany.
- Greenfield, Patrick, 2021. Balloon test flight plan under fire over solar geoengineering fears. *The Guardian*. URL <https://www.theguardian.com/environment/2021/feb/08/solar-geoengineering-test-flight-plan-under-fire-over-environmental-concerns-aoe>
- Harendra, 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. T. Zielinski, I. Sagan, W. Surosz. *Interdisciplinary Approaches for Sustainable Development Goals: Economic Growth, Social Inclusion and Environmental Protection*. Cham, Springer International Publishing: 169–187.

- Hauber, G. 2023. Norway's Slepner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales? Institute for Energy Economics and Financial Analysis.  
<https://ieefa.org/resources/norways-slepner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-ales>
- HBS Heinrich-Böll-Stiftung, BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Michael Succow Stiftung 2023. Mooratlas 2023 – Daten und Fakten zu nassen Klimaschützern. HBS, Berlin, 52 S.
- Heutel, G., Moreno-Cruz, J., Ricke, K. 2015. Climate Engineering Economics, NBER Working Paper Series, November 2015. Nach Sovacool 2021.
- Heyen, D. A. (2022). Ordnungsrechtliche Maßnahmen für nachhaltigen Konsum: Möglichkeiten zur Akzeptanzsteigerung. GAIA – Ecological Perspectives for Science and Society 31(1): 24-28.
- Ho, D. T. 2023. Carbon dioxide removal is an inefficient time machine. *Nature* 616(6.4.2023): 9.
- Hong, Y., Moore, J.C., Jevrejeva, S., Ji, D., Phipps, S.J., Lenton, A., Tilmes, S., Watanabe, S., Zhao, L., 2017. Impact of the GeoMIP G1 sunshade geoengineering experiment on the Atlantic meridional overturning circulation. *Environ. Res. Lett.* 12, 034009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5fb8>
- Horowitz, H.M., Wright, A.N., Huang, J., Jaegle, L., Alexander, B., 2018. Impacts of Marine Cloud Brightening on Atmospheric Chemistry. Presented at the AGU Fall Meeting Abstracts, pp. GC31H-1344.
- 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](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](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)
- IEA Internationale Energieagentur 2022. Direkte Luftabscheidung, Tracking-Bericht September 2022
- IPBES Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [Brondizio, E.S., Díaz, 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, 2007. AR4 Climate Change 2007 – Mitigation of Climate Change.
- 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/>
- IPCC [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, Péan, C., Pidcock, R., et al. (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 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. Summary for Policymakers. Geneva, Switzerland, WMO World Meteorological Organization: 34. This Summary for Policymakers was formally approved at the First Joint Session of Working Groups I, II and III of the IPCC and accepted by the 48th Session of the IPCC, Incheon, Republic of Korea, 6 October 2018.
- IPCC, 2021: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Naturwissenschaftliche Grundlagen. Beitrag von Arbeitsgruppe I zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, et al. (eds.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Druckvorlage, Oktober 2021. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern, Februar 2022.

- IPCC, 2022a: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (Hrsg.)]. In: Klimawandel 2022: Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit. Beitrag der Arbeitsgruppe II zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, et al. (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; Oktober 2022.  
<https://doi.org/10.48585/nx04-e135>
- IPCC, 2022b: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. In: Klimawandel 2022: Minderung des Klimawandels. Beitrag der Arbeitsgruppe III zum Sechsten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, et al. (Hrsg.)]. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom Juli 2022. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim, Bern; November 2022.  
[https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGIII-SPM\\_deutsch\\_barrierefrei.pdf](https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGIII-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf)
- Irvine, P.J., Kravitz, B., Lawrence, M.G., Muri, H., 2016. An overview of the Earth system science of solar geoengineering. *WIREs Clim. Change* 7, 815–833.  
<https://doi.org/10.1002/wcc.423>
- Irvine, P., Emanuel, K., He, J., Horowitz, L. W., Vecchi, G., Keith, D. 2019. Halving warming with idealized solar geoengineering moderates key climate hazards. *Nature Climate Change* 9(4): 295–299.
- Ito, A., 2017. Solar radiation management and ecosystem functional responses. *Clim. Change* 142, 53–66.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-017-1930-3>
- Ivanova, D., Vita, G., Wood, R., Lausset, C., Dumitru, A., Krause, K., Macinga, I., Hertwich, E. G. 2018. Carbon mitigation in domains of high consumer lock-in. *Global Environmental Change* 52: 117–130.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.06.006>
- Jackson, L.S., Crook, J.A., Forster, P.M., 2016. An intensified hydrological cycle in the simulation of geoengineering by cirrus cloud thinning using ice crystal fall speed changes. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 6822–6840.  
<https://doi.org/10.1002/2015JD024304>
- Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bram Bauwens, R., Baritz, F., Hagedorn, K. M., Byrne, K. 2007. How strongly can forest management influence soil C sequestration? *Geoderma* 137: 253–268.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>
- 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  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1904231116>
- 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.
- Jones, A., Haywood, J., Boucher, O., 2011. A comparison of the climate impacts of geoengineering by stratospheric SO<sub>2</sub> injection and by brightening of marine stratocumulus cloud. *Atmospheric Sci. Lett.* 12, 176–183. <https://doi.org/10.1002/asl.291>
- Jones, A., Haywood, J., Boucher, O., 2009. Climate impacts of geoengineering marine stratocumulus clouds. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 114.  
<https://doi.org/10.1029/2008JD011450>
- Jones, A., Haywood, J.M., Alterskjær, K., Boucher, O., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Irvine, P.J., Ji, D., Kravitz, B., Egill Kristjánsson, J., et al. 2013. The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmospheres* 118, 9743–9752.  
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50762>
- Jones, A.C., Hawcroft, M.K., Haywood, J.M., Jones, A., Guo, X., Moore, J.C., 2018. Regional Climate Impacts of Stabilizing Global Warming at 1.5 K Using Solar Geoengineering. *Earths Future* 6, 230–251.  
<https://doi.org/10.1002/2017EF000720>
- Jones, A.C., Haywood, J.M., Dunstone, N., Emanuel, K., Hawcroft, M.K., Hodges, K.I., Jones, A., 2017. Impacts of hemispheric solar geoengineering on tropical cyclone frequency. *Nat. Commun.* 8, 1382.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-01606-0>
- Kärcher, B., 2017. Cirrus Clouds and Their Response to Anthropogenic Activities. *Curr. Clim. Change Rep.* 3, 45–57.  
<https://doi.org/10.1007/s40641-017-0060-3>
- Keen, S. 2020. The appallingly bad neoclassical economics of climate change. *Globalizations*: 1–29.
- Keith, D.W., 2010. Photophoretic levitation of engineered aerosols for geoengineering. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 16428.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1009519107>
- Keith, D.W., Weisenstein, D.K., Dykema, J.A., Keutsch, F.N., 2016. Stratospheric solar geoengineering without ozone loss. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 14910.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1615572113>

- Keys, P. W., Barnes, E. A., Diffenbaugh, N. S., Hurrell, J. W., Bell, C. M. (2022). "Potential for perceived failure of stratospheric aerosol injection deployment." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119(40): e2210036119.
- Konvention 1977. Convention on the Prohibition of Military or Any Other Hostile Use of Environmental Modification Techniques. Unterzeichnet in Genf, 18. Mai 1977. In Kraft getreten am 5. Oktober 1978  
<https://2009-2017.state.gov/t/isn/4783.htm>
- Kravitz, B., Caldeira, K., Boucher, O., Robock, A., Rasch, P.J., Alterskjær, K., Karam, D.B., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Haywood, J.M., Irvine, P.J., Ji, D., Jones, A., Kristjánsson, J.E., Lunt, D.J., Moore, J.C., Niemeier, U., Schmidt, H., Schulz, M., Singh, B., Tilmes, S., et al. 2013. Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *J. Geophys. Res. Atmospheres* 118, 8320–8332.  
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50646>
- Kravitz, B., MacMartin, D.G., Mills, M.J., Richter, J.H., Tilmes, S., Lamarque, J.-F., Tribbia, J.J., Vitt, F., 2017. First Simulations of Designing Stratospheric Sulfate Aerosol Geoengineering to Meet Multiple Simultaneous Climate Objectives. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 122, 12,616–12,634.  
<https://doi.org/10.1002/2017JD026874>
- Kravitz, B., Robock, A., Boucher, O., Schmidt, H., Taylor, K.E., Stenchikov, G., Schulz, M., 2011. The Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Atmospheric Sci. Lett.* 12, 162–167.  
<https://doi.org/10.1002/asl.316>
- Kravitz, B., Robock, A., Oman, L., Stenchikov, G., Marquardt, A.B., 2009. Sulfuric acid deposition from stratospheric geoengineering with sulfate aerosols. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 114.  
<https://doi.org/10.1029/2009JD011918>
- Kristjánsson, J., Muri, H., Schmidt, H., 2015. The hydrological cycle response to cirrus cloud thinning. *Geophys. Res. Lett.* 42.  
<https://doi.org/10.1002/2015GL066795>
- Kritee, K., Nair, D., Zavala-Araiza, D., Proville, J., Rudek, J., Adhya, T.K., Loewe, T., Esteves, T., Balireddygar, S., Dava, O., et al. 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.
- Kuchler, M. 2014. Sweet dreams (are made of cellulose): Socio-technical imaginaries of second-generation bioenergy in the global debate. *Ecological Economics* 107: 431–437.
- Latham, J., 1990. Control of global warming? *Nature* 347, 339–340.  
<https://doi.org/10.1038/347339b0>
- Latham, J., Bower, K., Choulaton, T., Coe, H., Connolly, P., Cooper, G., Craft, T., Foster, J., Gadian, A., Galbraith, L., 2012. Marine cloud brightening. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 370, 4217–4262.
- Lawrence, D., Coe, M., Walker, W. S., Verchot, L., Vandecar, K. L. 2022. The unseen effects of deforestation: biophysical effects on climate. *Frontiers in Forests and Global Change* 5: ffgc.2022.756115.
- Lawrence, M.G., Schäfer, S., Muri, H., Scott, V., Oshlies, A., Vaughan, N.E., Boucher, O., Schmidt, H., Haywood, J., Scheffran, J., 2018. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. *Nat. Commun.* 9, 3734.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3>
- Lebel, E. D., Lu, H. S., Vielstädte, L., Kang, M., Banner, P., Fischer, M. L., Jackson, R. B. 2020. Methane Emissions from Abandoned Oil and Gas Wells in California. *Environmental Science & Technology* 54(22): 14617–14626.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05279>
- Lee, X., Goulden, M.L., Hollinger, D.Y., Barr, A., Black, T.A., Bohrer, G., Bracho, R., Drake, B., Goldstein, A., Gu, L., et al. 2011. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature* 479, 384–387.  
<https://doi.org/10.1038/nature10588>
- Leggewie, C., Welzer, H. 2009. *Das Ende der Welt, wie wir sie kannten, Klima, Zukunft und die Chancen der Demokratie.* Frankfurt/Main, S. Fischer Verlag.
- Lenton, T.M. 2010. The potential for land-based biological CO<sub>2</sub> removal to lower future atmospheric CO<sub>2</sub> concentration *Carbon Management* 1(1): 145–160.
- Leujak, W., Ginzky, H. & Claussen, U. 2011: Eisendüngung – Mehr CO<sub>2</sub> Fixierung durch das Meer? *Warnsignale Klima – Die Meere:* 348–353
- Living Carbon Team [Yumin Tao, Li-Wei Chiu, Jacob W. Hoyle, Jessica Du, Karli Rasmussen, Patrick Mellor, Christian Richey, Julie Kuiper, Madeline Fried, Rebecca A. Dewhirst, et al.]. 2023. Enhanced photosynthetic efficiency for increased carbon assimilation and woody biomass production in hybrid poplar INRA 717-1B4. *BioRxiv Preprints.*  
<https://doi.org/10.1101/2022.02.16.480797>
- Lohmann, U., Gasparini, B., 2017. A cirrus cloud climate dial? *Science* 357, 248.  
<https://doi.org/10.1126/science.aan3325>
- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., Grace, J. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455(7210): 213–215.

- MacMartin, D.G., Kravitz, B., Tilmes, S., Richter, J.H., Mills, M.J., Lamarque, J.-F., Tribbia, J.J., Vitt, F., 2017. The Climate Response to Stratospheric Aerosol Geoengineering Can Be Tailored Using Multiple Injection Locations. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 122, 12,574–12,590.  
<https://doi.org/10.1002/2017JD026868>
- MacMartin, D.G., Wang, W., Kravitz, B., Tilmes, S., Richter, J.H., Mills, M.J., 2019. Timescale for Detecting the Climate Response to Stratospheric Aerosol Geoengineering. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 124, 1233–1247.  
<https://doi.org/10.1029/2018JD028906>
- Malavelle, F.F., Haywood, J.M., Jones, A., Gettelman, A., Clarisse, L., Bauduin, S., Allan, R.P., Karset, I.H.H., Kristjánsson, J.E., Oreopoulos, L., Cho, N., Lee, D., Bellouin, N., Boucher, O., Grosvenor, D.P., Carslaw, K.S., Dhomse, S., Mann, G.W., Schmidt, A., Coe, H., Het al. 2017. Strong constraints on aerosol–cloud interactions from volcanic eruptions. *Nature* 546, 485–491.  
<https://doi.org/10.1038/nature22974>
- 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, world-wide. *Global Environmental Change* 53: 90–103.
- Marchetti, C. 1977. On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem. *Climatic Change* 1(1): 59–68.
- Marchetti, C. 1976. Geoengineering and the Energy Island. W. Häfele (Ed.). *Second Status Report of the IIASA Project on Energy Systems RR-76-001*. Laxenburg, Austria, IIASA: 220–244.
- Martin, C. 2021. Geoengineering and the Use of Force. <https://opiniojuris.org/2021/01/20/geoengineering-and-the-use-of-force/>
- Martin, M. A., Sendra, O. A., Bastos, A., Bauer, N., Bertram, C., Blenckner, T., Bowen, K., Brando, P. M., Rudolph, T. B., Büch, M., et al. 2021. Ten new insights in climate science 2021: a horizon scan. *Global Sustainability* 4: e25.
- Mautner, M., 1990. Deep-space solar screens against climatic warming: Technical and research requirements. *Am. Astronaut. Soc. Adv. Astronaut. Sci.* 73, 1–19.
- McLaren, D., 2016. Mitigation deterrence and the “moral hazard” of solar radiation management. *Earths Future* 4, 596–602.  
<https://doi.org/10.1002/2016EF000445>
- Mills, M. B., Malhi, Y., Ewers, R. M., Kho, L. K., Teh, Y. A., Both, S., Burslem, D. F. R. P., Majalap, N., Nilus, R., Huaraca Huasco, W., et al. (2023). Tropical forests post-logging are a persistent net carbon source to the atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120(3): e2214462120.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.2214462120>
- Mitchell, D.L., Finnegan, W., 2009. Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environ. Res. Lett.* 4, 045102.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045102>
- Moore, J.C., Rinke, A., Yu, X., Ji, D., Cui, X., Li, Y., Alterskjær, K., Kristjánsson, J.E., Muri, H., Boucher, O., et al. 2014. Arctic sea ice and atmospheric circulation under the GeoMIP G1 scenario. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 119, 567–583.  
<https://doi.org/10.1002/2013JD021060>
- Morgan, G. 2009. Governance and Geoengineering: Who Decides and How. Panel Discussion at the National Academies Workshop on “Geoengineering – Options to Respond to Climate Change: Steps to Establish a Research Agenda”, June 15, 2009. Washington, DC. *Nach Sovacool* 2021.
- Moriarty, P., Honnery, D. (2020). Feasibility of a 100% Global Renewable Energy System. *Energies* 13(21): 5543.  
<https://doi.org/10.3390/en13215543>
- Moriyama, R., Sugiyama, M., Kurosawa, A., Masuda, K., Tsuzuki, K., Ishimoto, Y., 2017. The cost of stratospheric climate engineering revisited. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 22, 1207–1228.  
<https://doi.org/10.1007/s11027-016-9723-y>
- Muri, H., Kristjánsson, J.E., Storelvmo, T., Pfeffer, M.A., 2014. The climatic effects of modifying cirrus clouds in a climate engineering framework. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 119, 4174–4191.  
<https://doi.org/10.1002/2013JD021063>
- Nabuurs, G.-J., R. Mrabet, R., Abu Hatab, A., Bustamante, M., Clark, H., Havlik, P., House, J., Mbow, C., Ninan, K.N., Popp, A., et al. 2022. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khouradajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Bet al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi:  
<https://doi.org/10.1017/9781009157926.009>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2019. *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington, DC, USA, The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25259>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. *Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance*. Washington, DC, USA, The National Academies Press.  
<https://doi.org/10.17226/25762>
- Neugebauer, G. 2022. Die Bundestagswahl 2021– eine unvollständige Analyse. *perspektiven ds* 38(2): 18–23.

- Neumann, W. 2010. Krückentechnologie statt Brückentechnologie. *Politische Ökologie* 123: 56–59.
- Nunes, M.R., van Es, H.M., Schindelbeck, R., Ristow, A.J., Ryan, M., 2018. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. *Geoderma* 328, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.031>
- Oppon, E., Richter, J. S., Koh, S. C. L., Nabayiga, H. 2023. Macro-level economic and environmental sustainability of negative emission technologies; Case study of crushed silicate production for enhanced weathering. *Ecological Economics* 204: 107636. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107636>.
- Otto, I. M., Wiedermann, M., Cremades, R., Donges, J. F., Auer, C., Lucht, W. 2020. Human agency in the Anthropocene. *Ecological Economics* 167: 106463.
- Otto, I. M., Donges, J. F., Cremades, R., Bhowmik, A., Hewitt, R. J., Lucht, W., Rockström, J., Allerberger, F., McCaffrey, M., Doe, S. S. P., et al. 2020. Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(5): 2354.
- Parkes, B., Challinor, A., Nicklin, K., 2015. Crop failure rates in a geoengineered climate: impact of climate change and marine cloud brightening. *Environ. Res. Lett.* 10, 084003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084003>
- Parkes, B., Gadian, A., Latham, J., 2012. The Effects of Marine Cloud Brightening on Seasonal Polar Temperatures and the Meridional Heat Flux. *ISRN Geophys.* 2012, 7.
- Pasztor, J., Scharf, C., Schmidt, K.-U., 2017. How to govern geo-engineering? *Science* 357, 231. <https://doi.org/10.1126/science.aan6794>
- Pathak, M., Slade, R., Shukla, P.R., Skea, J., Pichs-Madruga, R., Ürge-Vorsatz, D. 2022. Technical Summary. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157926.002>
- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., de Wit, C. A., Diamond, M. L., Fantke, P., Hassellöv, M., MacLeod, M., Ryberg, M. W., Søgaard Jørgensen, P., Villarrubia-Gómez, P., Wang, Z., Hauschild, M. Z. 2022. Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science & Technology*.
- Pihl, E., Alfredsson, E., Bengtsson, M., Bowen, K. J., Cástan Broto, V., Chou, K. T., Cleugh, H., Ebi, K., Edwards, C. M., Fisher, E., et al. 2021. Ten new insights in climate science 2020 – a horizon scan. *Global Sustainability* 4: 10.1017/sus.2021.1012.
- Pierrehumbert, R., 2017. The trouble with geoengineers "hacking the planet." *Bull. At. Sci.* URL <https://thebulletin.org/2017/06/the-trouble-with-geoengineers-hacking-the-planet/#> (accessed 12.5.19)
- Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Arneeth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W. L., et al. 2021. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. Bonn, Germany, IPBES Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Secretariat.
- Pomrehn, W. 2010. Der Planet und die Chemotherapie. *Politische Ökologie* 28(120): 11–14.
- Preston, C.J., 2013. Ethics and geoengineering: reviewing the moral issues raised by solar radiation management and carbon dioxide removal. *WIREs Clim. Change* 4, 23–37. <https://doi.org/10.1002/wcc.198>
- Proctor, J., Hsiang, S., Burney, J., Burke, M., Schlenker, W. 2018. Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions. *Nature*: 1–4.
- Rabitz, F., 2019. Governing the termination problem in solar radiation management. *Environ. Polit.* 28, 502–522. <https://doi.org/10.1080/09644016.2018.1519879>
- Rabke, J. J. 2022. Survey of timber structures - Validation studies of a service life prediction tool. Masterarbeit, Universität Göttingen, Göttingen.
- Rasch, P.J., Tilmes, S., Turco, R.P., Robock, A., Oman, L., Chen, C.-C. (Jack), Stenchikov, G.L., Garcia, R.R., 2008. An overview of geoengineering of climate using stratospheric sulphate aerosols. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 366, 4007–4037. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0131>
- Reynolds, J.L., 2019. Solar geoengineering to reduce climate change: a review of governance proposals. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 475, 20190255. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0255>
- 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>.

- Ridgwell, A., Singarayer, J.S., Hetherington, A.M., Valdes, P.J., 2009. Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bioengineering. *Curr. Biol.* 19, 146–150. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.12.025>
- Ricke, K. (2023). Solar geoengineering is scary – that’s why we should research it. Research on blocking sunlight needs a dose of realpolitik. *Nature* 614(391).
- Ricke, K., Ivanova, D., McKie, T., Rugenstein, M. (2021). Reversing Sahelian Droughts. *Geophysical Research Letters* 48(14): e2021GL093129.
- Robock, A., 2015. Stratospheric aerosol geoengineering. *AIP Conf. Proc.* 1652, 183–197. <https://doi.org/10.1063/1.4916181>
- Robock, A., 2008. 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. *Bull. At. Sci.* 64, 14–18. <https://doi.org/10.2968/064002006>
- Rising, J. A., Taylor, C., Ives, M. C., Ward, R. E. T. (2022). Challenges and innovations in the economic evaluation of the risks of climate change. *Ecological Economics* 197: 107437.
- Robertson, S. (2021). Transparency, trust, and integrated assessment models: An ethical consideration for the Intergovernmental Panel on Climate Change. *WIREs Climate Change* 12(1): e679.
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics* 54(9): 4169–4189.
- SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen 2020. Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. *Umweltgutachten 2020*. Berlin, SRU: [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2016\\_2020/2020\\_Umweltgutachten\\_Entschlossene\\_Umweltpolitik.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&tv=2](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.pdf?__blob=publicationFile&tv=2)
- 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.
- Salter, S., Sortino, G., Latham, J., 2008. Sea-going hardware for the cloud albedo method of reversing global warming. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 366, 3989–4006. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0136>
- 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.
- Sarmiento, J.L., Orr, J.C. 1991. Three-dimensional simulations of the impact of Southern Ocean nutrient depletion on atmospheric CO<sub>2</sub> and ocean chemistry. *Limnol. Oceanogr.* 36: 1928–1950.
- Scheffran, J. 2020. Wissenschaft an der Klimafont. *Forum Wissenschaft* 37(3): 12–16.
- Schneider, T., Kaul, C. M., Pressel, K. G. 2020. Solar geoengineering may not prevent strong warming from direct effects of CO<sub>2</sub> on stratocumulus cloud cover. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(48): 30179.
- 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>
- Schuiling, R. D., Krijgsman, P. 2006. Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester CO<sub>2</sub>. *Climatic Change* 74(1): 349–354. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-3485-y>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J. et al. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change* 7: 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>
- Seneviratne, S.I., Phipps, S.J., Pitman, A.J., Hirsch, A.L., Davin, E.L., Donat, M.G., Hirschi, M., Lenton, A., Wilhelm, M., Kravitz, B., 2018. Land radiative management as contributor to regional-scale climate adaptation and mitigation. *Nat. Geosci.* 11, 88–96. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0057-5>
- Seymour, F., M. Wolosin, M.E., Gray, E. (2022). Not Just Carbon: Capturing All the Benefits of Forests for Stabilizing the Climate from Local to Global Scales. Washington, DC, USA, World Resources Institute.
- Singarayer, J.S., Ridgwell, A., Irvine, P., 2009. Assessing the benefits of crop albedo bio-geoengineering. *Environ. Res. Lett.* 4, 045110. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/045110>
- Skea, J., Shukla, P., Al Khourdajie, A., McCollum, D. (2021). Intergovernmental Panel on Climate Change: Transparency and integrated assessment modeling. *WIREs Climate Change* 12(5): e727.
- Slameršak, A., Kallis, G., O’Neill, D. W. (2022). Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition. *Nature Communications* 13(1): 6932.
- Smith, W., Wagner, G., 2018. Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment. *Environ. Res. Lett.* 13, 124001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae98d>

- Smith, C., Baker, J. C. A., Spracklen, D. V. (2023). Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1>
- 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.
- Sovacool, B. K. 2021. Reckless or righteous? Reviewing the sociotechnical benefits and risks of climate change geoengineering. *Energy Strategy Reviews* 35: 100656.
- Spangenberg, J. H., Kurz, R. (2023). Epochal turns: Uncomfortable insights, uncertain outlooks. *Sustainable Development*: 10.1002/sd.2512. Sikka, T. 2020. Activism and Neoliberalism: Two Sides of Geoengineering Discourse. *Capitalism Nature Socialism* 31(1): 84-102.
- Spangenberg, J.H., 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., 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 bioenergy. *Ecological Economics* 104: 22-32.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.04.025>
- 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.
- Stanhill, G., Cohen, S., 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.* 107, 255-278.  
[https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0)
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., et al. 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (33): 8252-8259.
- Stjern, C.W., Muri, H., Ahlm, L., Boucher, O., Cole, J.N.S., Ji, D., Jones, A., Haywood, J., Kravitz, B., Lenton, A., et al. 2018. Response to marine cloud brightening in a multi-model ensemble. *Atmospheric Chem. Phys.* 18, 621-634.  
<https://doi.org/10.5194/acp-18-621-2018>
- Storelvmo, T., Herger, N., 2014. Cirrus cloud susceptibility to the injection of ice nuclei in the upper troposphere. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 119, 2375-2389.  
<https://doi.org/10.1002/2013JD020816>
- Streifer, J., Kriegl, E., Bauer, N., Luderer, G., Pietzcker, R. C., Giannousakis, A., Edenhofer, O. 2021. Alternative carbon price trajectories can avoid excessive carbon removal. *Nature Communications* 12(1): 2264.
- Su, B., Huang, J., Fischer, T., Wang, Y., Kundzewicz, Z. W., Zhai, J., Sun, H., Wang, A., Zeng, X., Wang, G., 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.
- Temple, J. 2022. A startup says it's begun releasing particles into the atmosphere, in an effort to tweak the climate. <https://www.technologyreview.com/2022/12/24/1066041/a-startup-says-its-begun-releasing-particles-into-the-atmosphere-in-an-effort-to-tweak-the-climate/>
- Tilmes, S., Sanderson, B.M., O'Neill, B.C., 2016. Climate impacts of geoengineering in a delayed mitigation scenario. *Geophys. Res. Lett.* 43, 8222-8229.  
<https://doi.org/10.1002/2016GL070122>
- Tollefson, J. 2023. Can adding antiacids to the ocean slow global warming? *Nature* 618 (29 June 2023): 902-904.
- Toreti, A., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Cammalleri, C., de Jager, A., Di Ciollo, C., Hraat Essfelder, A., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., et al. (2022). Drought in Europe. Luxembourg, Publications Office of the European Union. JRC130493.  
<https://doi.org/10.2760/264241>
- Trisos, C.H., Amatulli, G., Gurevitch, J., Robock, A., Xia, L., Zambri, B. 2018. Potentially dangerous consequences for biodiversity of solar geoengineering implementation and termination. *Nat. Ecol. Evol.* 2, 475-482.  
<https://doi.org/10.1038/s41559-017-0431-0>
- UBA Umweltbundesamt 2011. GeoEngineering. Wirksamer Klimaschutz oder Größenwahn? Methoden – Rechtliche Rahmenbedingungen – Umweltpolitische Forderungen. Dessau-Roßlau: UBA.  
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4125.pdf> (13.01.2019)
- 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 [Günther, J., Lehmann, H., Lorenz, U., Purr, K.]. 2019. Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- UBA Umweltbundesamt. 2019. Was ist Geoengineering? <https://www.umweltbundesamt.de/themen/nachhaltigkeit-strategien-internationales/umweltrecht/umweltvoelkerrecht/geoengineering-governance#was-ist-geoengineering>
- UBA Umweltbundesamt. 2022. Carbon Capture and Storage. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#grundlegende-informationen>
- Ulgati, S. 2001. A Comprehensive Energy and Economic Assessment of Biofuels: When "Green" Is Not Enough. *Critical Reviews in Plant Sciences* 20(1): 71-106.
- Vaughan, N.E., Lenton, T.M., 2011. A review of climate geoengineering proposals. *Clim. Change* 109, 745-790. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0027-7>
- Veldman, J. W., Aleman, J. C., Alvarado, S. T., Anderson, M., Archibald, S., Bond, W. J., Boutton, T. W., Buchmann, N., Buisson, E., et al. 2019. Comment on "The global tree restoration potential", *Science* 366(6463): eaay7976. <https://doi.org/10.1126/science.aay7976>
- Vielstädte, L., Haeckel, M., Karstens, J., Linke, P., Schmidt, M., Steinle, L., Wallmann, K. 2017. Shallow Gas Migration along Hydrocarbon Wells—An Unconsidered, Anthropogenic Source of Biogenic Methane in the North Sea. *Environmental Science & Technology* 51(17): 10262-10268. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02732>
- 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
- Visioni, D., MacMartin, D.G., Kravitz, B., Tilmes, S., Mills, M.J., Richter, J.H., Boudreau, M.P., 2019. Seasonal Injection Strategies for Stratospheric Aerosol Geoengineering. *Geophys. Res. Lett.* 46, 7790-7799. <https://doi.org/10.1029/2019GL083680>
- Voosen, P. (2022). Ocean geoengineering scheme aces field test. *Science* 378 (6626): 1266-1267.
- Wang, H., Rasch, P.J., Feingold, G., 2011. Manipulating marine stratocumulus cloud amount and albedo: a process-modelling study of aerosol-cloud-precipitation interactions in response to injection of cloud condensation nuclei. *Atmos Chem Phys* 11, 4237-4249. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4237-2011>
- 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\\_weis10\\_emik.php](https://www.itas.kit.edu/projekte_weis10_emik.php) [http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5352/1/Weiss\\_Annika\\_Diss.pdf](http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5352/1/Weiss_Annika_Diss.pdf)
- Welsby, D., Price, J., Pye, S., Ekins, P. (2021). Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world. *Nature* 597(7875): 230-234. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03821-8>. BUND Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. 2015. Terra Preta / Pyrolysekohle: BUND-Einschätzung ihrer Umweltrelevanz. Berlin, BUND. <http://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/terra-pretapyrolysekohle-bund-einschaetzung-ihrer-umweltrelevanz>
- Werstervelt, A. 2023. Big oil firms touted algae as climate solution. Now all have pulled funding. *The Guardian* 2023(March 17th). <https://www.theguardian.com/environment/2023/mar/17/big-oil-algae-biofuel-funding-cut-exxonmobil>
- Wetter, K. J., Ribeiro, S. (2016). The fix is in – Geoengineering our way out of the climate crisis. *The Secure and the Dispossessed*. N. Buxton and B. Hayes. London, Pluto Press: 153-171.
- WHO et al. 2022. International Health Organizations Call for Fossil Fuel Non-Proliferation Treaty To Protect Lives Of Current and Future Generations. <https://fossilfueeltreaty.org/health-letter>
- Whyte, K.P., 2012. Now This! Indigenous Sovereignty, Political Obliviousness and Governance Models for SRM Research. *Ethics Policy Environ.* 15, 172-187. <https://doi.org/10.1080/21550085.2012.685570>
- Wieding, J., Stubenrauch, J., Ekardt, F., 2020. Human Rights and Precautionary Principle: Limits to Geoengineering, SRM, and IPCC Scenarios. *Sustainability* 12. <https://doi.org/10.3390/su12218858>
- Wiens, J. J. 2016. Climate-Related Local Extinctions Are Already Widespread among Plant and Animal Species. *PLoS Biology* 14(12): e2001104.
- Wiertz, T. 2010. Von Regenmachern und Klimaklempnern. *Politische Ökologie* 28(120): 16-18.
- Wigley, T.M.L., 2006. A Combined Mitigation/Geoengineering Approach to Climate Stabilization. *Science* 314, 452. <https://doi.org/10.1126/science.1131728>
- Williamson, P., Bodle, R., 2016. Update on climate geoengineering in relation to the Convention on Biological Diversity: Potential impacts and regulatory framework. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10957.23522>

Winklmayr, C., Muthers, S., Niemann, H., Mücke, H.-G. an der Heiden, M. (2022). „Hitzebedingte Mortalität in Deutschland zwischen 1992 und 2021.“ Deutsches Ärzteblatt 119(26).

Wintershaldea 2023. Tweet am 16-1-23: Zum Auftakt des „Handelsblatt Energiegipfel“ sagte Wirtschaftsminister Robert Habeck in Berlin: „Wir brauchen CCS und wollen den grenzüberschreitenden Handel mit CO<sub>2</sub> ermöglichen.“  
<https://twitter.com/Dwintershaldea/status/1614965382019960832>

World Meteorological Organization WMO. 2022. Executive Summary. Scientific Assessment of Ozone Depletion. GAW Report No. 278. WMO, Geneva.  
<https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf>

Wunderling, N., Donges, J. F., Kurths, J., Winkelmann, R. 2021. Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth System Dynamics* 12(2): 601-619.  
<https://doi.org/10.5194/esd-12-601-2021>

WWA World Weather Attribution [Otto, F.E.L., Zachariah, M., Fahad Saeed, F., Siddiqi, A., Shahzad, K., Mushtaq, H., Arulalan, T., Krishna AchutaRao, K., Chaithra, S.T., Clair Barnes, C., et al.] 2022. Climate change likely increased extreme monsoon rainfall, flooding highly vulnerable communities in Pakistan.  
<https://doi.org/10.1088/2752-5295/acbfd5>

Yadav, G.S., Lal, R., Meena, R.S., Babu, S., Das, A., Bhowmik, S.N., Datta, M., Layak, J., Saha, P., 2019. Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecol. Indic.* 105, 303-315.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.071>

Yu, X., Moore, J.C., Cui, X., Rinke, A., Ji, D., Kravitz, B., Yoon, J.-H., 2015. Impacts, effectiveness and regional inequalities of the GeoMIP G1 to G4 solar radiation management scenarios. *Glob. Planet. Change* 129, 10-22.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.010>

Ziebarth, N. 2010: Die Technik allein wird's nicht richten – Die ökologischen Dimensionen des Geo-Engineering. *Politische Ökologie* 120: 30-32.

Ziegler, R. 2020. Paludiculture as a critical sustainability innovation mission. *Research Policy* 49(5): 103979.

# Die politische Position des BUND/Friends of the Earth Germany in den BUND Positionen

Die Welt steht vor immensen ökologischen, gesellschaftlichen und sozialen Herausforderungen. Der BUND/Friends of the Earth sucht und gestaltet dafür Lösungen, die ökologischen und sozialen Kriterien gerecht werden. Als Umwelt- und Naturschutzverband kämpft er insbesondere für die Einhaltung der 1,5 Grad-Obergrenze in der Klimakrise und für Klimagerechtigkeit, für die Beendigung des Artensterbens, und den Schutz und die Wertschätzung von Natur und biologischer Vielfalt. Wir fordern eine tatsächlich nachhaltige Landwirtschaft ohne Gentechnik, den sofortigen Atomausstieg und eine Minderung des Ressourcenverbrauchs. Kampagnen des BUND zielen auf ein Ende der Vermüllung und Vergiftung unserer Umwelt, unter anderem mit Pestiziden, zahllosen Schadstoffen und Mikroplastik. Als Nachhaltigkeitsverband setzt sich der BUND für soziale wie ökologische Gerechtigkeit, Armutsbekämpfung, Menschenrechte und Demokratie ein. Das eine ist ohne das andere nicht zu haben, das haben uns unsere Erfahrungen gelehrt.

Diese Ziele sind nur zu erreichen, wenn nicht nur alle umwelt- und sozialverträglichen Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz bei der Ressourcennutzung ausgeschöpft werden. Zur absoluten Reduzierung unserer Ressourcenentnahme aus der Umwelt brauchen wir außerdem Suffizienz: wir müssen nicht nur anders, sondern auch weniger konsumieren. Eine nachhaltige Änderung der Lebensweise aller Bürger\*innen ist aber keine individuelle Verantwortung, sondern eine gemeinsame und gesellschaftliche. Zur Förderung des Gemeinwohls brauchen wir mehr Mitwirkungsrechte der Zivilgesellschaft, vor allem aber förderliche politische Rahmenbedingungen. So fordert der BUND seit langem, durch Energiesparen den Endenergieverbrauch mindestens um die Hälfte zu senken, damit der Rest aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann – Studien des Umweltbundesamtes geben diesen Forderungen Recht.

Sollen die Ausrottung von immer mehr Arten beendet und unsere Naturräume geschützt werden, dann muss endlich der Flächenverbrauch für immer mehr Straßen-, Gewerbe- und Siedlungsflächen beendet und die Landwirtschaft natur- und tierwohlverträglich werden. Der Rohstoffverbrauch muss im Laufe dieses Jahrhunderts drastisch, z. B. um einen Faktor 10 oder mehr, reduziert werden – eine schnelle und massive Absenkung würde helfen die Klimakrise zu bewältigen, den Biodiversitätsverlust zu stoppen und den kommenden Generationen in allen Ländern gleiche Entwicklungschancen zu ermöglichen.

Stofflich und energetisch muss unser Wirtschaftssystem schlanker werden. Das ist eine große Herausforderung, aber es ist machbar. Jedoch wird die Bewältigung dieser Aufgabe unmöglich, wenn die Politik weiterhin dem Wirtschaftswachstum Vorrang vor der Bewahrung unserer Lebensgrundlagen gibt. Wachstumspolitik, ob erfolgreich oder nicht, ist der Treiber für Schäden an Natur und Umwelt – beispielsweise durch den Ausbau von Infrastruktur mit exzessivem Flächenverbrauch (Flughäfen, Straßen, Flussausbau), die Förderung einer exportorientierten Landwirtschaft mit viel zu hohem Tierbestand. Sie fordert und fördert Niedriglohnsektoren, Einkommenspolarisierung und eine globale Raubwirtschaft. Demokratische Entscheidungen und Bürger\*innenmitsprache werden durch Beschleunigungsgesetze und die Schwächung von Bürger\*innenbeteiligung eingeschränkt, um die Wachstumsziele nicht zu gefährden.

Die notwendige sozial-ökologische Transformation bietet die Chance zu einem gerechten und weniger durch Egoismen, Konkurrenz und Ausbeutung bestimmten Leben im Einklang mit den planetaren Systemen. Wie notwendig eine solche Wende zum guten Leben ist, haben viele Mitbürger\*innen erkannt, nicht zuletzt in der Pandemiekrise seit 2020. Viele Arbeitsverhältnisse und Lebensweisen werden sich

ändern und ändern müssen, durch neue Technologien ebenso wie durch eine neue, nachhaltige Gestaltung für gute Erwerbs- wie Nichterwerbsarbeit. Das erfordert nicht nur neue Berufsbilder und Qualifikationen, sondern auch, dass Status, Bezahlung und soziale Sicherung in vielen Bereichen von Wirtschaft und Verwaltung verbessert werden.

Der BUND steht nicht nur für die ökologische, sondern auch für soziale, institutionelle und ökonomische Nachhaltigkeit – deshalb enthalten unsere Positionen immer auch Ansätze, die zu sozialer Gerechtigkeit, zu guter Arbeit und zu zukunftsfähigem Wirtschaften beitragen. Dabei blickt der BUND stets über den Tellerrand und entwickelt Perspektiven zusammen mit den Partnerorganisationen in unserem internationalen Netzwerk, Friends of the Earth Europe und Friends of the Earth International und anderen Organisationen der Zivilgesellschaft.

Es gibt Alternativen zu einer Politik, die mit immer höherer Geschwindigkeit in die Sackgasse fährt! Solche Alternativen zeigt der BUND in den BUND-Positionen, die von den Bundesarbeitskreisen und vom Wissenschaftlichen Beirat des BUND erarbeitet sowie vom Bundesvorstand beschlossen werden. In den Bundesarbeitskreisen wird akademische und nicht-akademische Expertise zusammengeführt, im wissenschaftlichen Beirat werden die Positionen von Expert\*innen aus 20 Themenbereichen gemeinsam geprüft – der BUND praktiziert seit Jahrzehnten das Prinzip der transdisziplinären Wissenschaft. So basieren alle BUND-Positionen auf mehrfach und interdisziplinär geprüften aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen und zeigen politische und gesellschaftliche Lösungswege auf. Jede dieser Positionen, auch die hier vorliegende, ist ein wichtiger Baustein im Gesamtbild des sozial-ökologischen Umbaus hin zu einer nachhaltigen Wirtschafts- und Lebensweise.

# The political position of BUND/Friends of the Earth Germany in the BUND Positions

The world is facing immense ecological, social and societal challenges. BUND/Friends of the Earth Germany seeks and designs solutions that meet ecological and social sustainability criteria. As an environmental and nature conservation organisation, we fight in particular for compliance with the 1.5 °C upper limit in the climate crisis and for climate justice, for an end to the extinction of species, and for the protection and appreciation of nature and biological diversity. We campaign for truly sustainable agriculture without genetic engineering, an immediate nuclear phase-out, and a reduction in resource consumption. BUND/FoE Germany campaigns aim to end the domestic and global dumping of industrial and household waste, the littering and poisoning of our environment with pesticides, countless pollutants and microplastics, among other things. As Germany's largest sustainability NGO, BUND/FoE Germany is committed to social and ecological justice, the fight against poverty, human rights and democracy. Our experience has taught us that you cannot have one without the other.

These goals cannot be achieved if only the environmentally and socially sustainable possibilities for increasing the resource use efficiency are exhausted. For an absolute reduction of our resource extraction from the environment, we also need sufficiency: we must not only consume differently, but also less. A sustainable change in the lifestyle of all citizens is not an individual responsibility, but a common and societal one. To promote the common good, we need not only more rights of participation for civil society, but above all we need a favourable political framework. For example, BUND/FoE Germany has long been calling for energy conservation to reduce final energy consumption by at least half, so that the rest can be provided by renewable energies – studies by the German Environment Agency confirm these demands.

If the extinction of more and more species is to be stopped and our natural areas protected, then the

consumption of land for more and more roads, commercial zones and residential areas must finally be stopped and agriculture must be made compatible with the environment and animal welfare. The consumption of raw materials must be drastically reduced in the course of this century, e.g. by a factor of 10 or more – a rapid and massive reduction would help to overcome the climate crisis, to stop the loss of biodiversity and to enable future generations in all countries to have equal development opportunities.

Our economic system must become leaner in terms of materials and energy. This is a great challenge, but it can be done. However, it will be impossible to accomplish this task if policy-makers continue to give priority to economic growth over the preservation of the basics of nature and human subsistence. Growth policy, whether succeeding in stimulating economic growth or not, is the driver of damage to nature and the environment – for example, through the expansion of infrastructure with excessive land consumption (airports, roads, river expansion), the promotion of export-oriented agriculture with far too many animals and much more. It demands and promotes low-wage sectors, income polarisation and a global predatory economy. Democratic decisions and citizen participation are restricted by regulations accelerating spatial planning and the weakening of citizen participation and their right to bring government decisions to court, all in order not to endanger the growth targets. Governments on all levels, inspired by neoliberal policies, have enacted such regulations believing this would accelerate economic growth.

The necessary socio-ecological transformation offers the chance for a good life within the planetary boundaries, under living and working conditions with more justice and community spirit and less determined by egoism, competition and exploitation. Many of our fellow citizens have recognised how necessary such a turn towards the good life is, not least in the pandemic crisis since 2020 and the militarisation of public discourses since the 2022 Russian invasion of

Ukraine. Many working conditions and lifestyles will change and have to change, through new technologies as well as through a new, sustainable design and new, sustainable forms of well-remunerated and voluntary work. This requires not only new job profiles and qualifications, but also that status, pay and social security are improved in many areas of the economy and administration.

BUND/FoE Germany stands not only for ecological, but also for social, institutional and economic sustainability – that is why our positions always include approaches that contribute to social justice, good work and sustainable economic activity. In doing so, BUND/FoE Germany always looks beyond the horizon and develops perspectives together with the partner organisations in our international network, Friends of the Earth Europe and Friends of the Earth International, and other civil society organisations sharing our vision. BUND/FoE Germany is not linked to any political party and – proudly – financially independent from government funding, and does neither accept business donations, nor enters partnerships with commercial groups or entities. This gives us the freedom to choose the right partners among, for instance, consumer, development, feminist or peace NGOs, trade unions and religious organisations.

There are alternatives to a policy that is driving into a dead end at an ever increasing speed! BUND/FoE Germany presents such alternatives in the BUND Positions, which are developed by the 20 federal thematic working groups, refined by the BUND/FoE Germany Scientific Committee, and finally adopted by the Federal Board. Academic and non-academic expertise is brought together on an equal footing in the federal thematic working groups, and the draft Positions are jointly examined in the scientific advisory board by experts from 20 subject areas – BUND/FoE Germany has been practising the principles of inter- and transdisciplinary science for decades. Thus, all BUND Positions are based on socially robust and evidence based

interdisciplinary scientific knowledge (not necessarily mainstream), providing the knowledge base for campaigning, public mobilisation, environmental education, political lobbying for political and social solutions to sustainability problems, and for managing high biodiversity value land owned or managed by BUND/FoE Germany. Each of these Positions, including the one presented here, is an important building block in the overall picture of the socio-ecological transformation towards a sustainable economy and way of life.

## **Impressum**

**Herausgeber:**

*Bund für Umwelt  
und Naturschutz  
Deutschland e.V. (BUND),  
Kaiserin-Augusta-Allee 5  
10553 Berlin*

**Telefon:** 0 30/2 75 86-40  
**Telefax:** 0 30/2 75 86-440  
**mail:** [info@bund.net](mailto:info@bund.net)  
[www.bund.net](http://www.bund.net)

**Autor\*innen:**

*Wissenschaftlicher Beirat des  
BUND, Jessica Stubenrauch,  
Joachim H. Spangenberg*

**V.i.S.d.P.:** Petra Kirberger

**Produktion:** Natur & Umwelt  
GmbH

November 2023