

Geoengineering

Ausgangslage

Warum Geoengineering im Kontext mit dem Klimawandel?

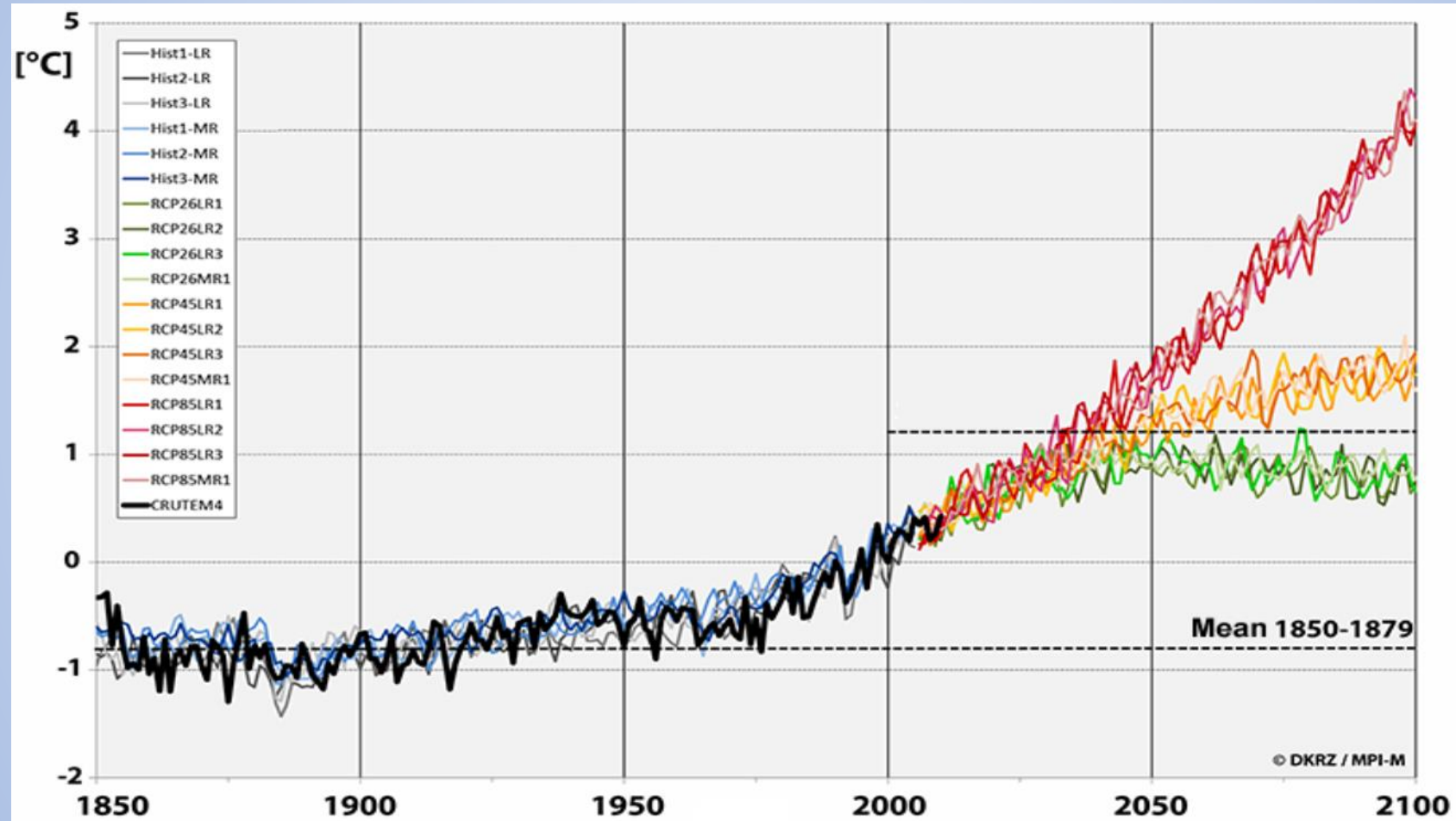
Was versteht man darunter?

- CO₂-Abscheidung und – Speicherung (CDR)
- Eingriffe in den globalen Strahlungshaushalt (RM)

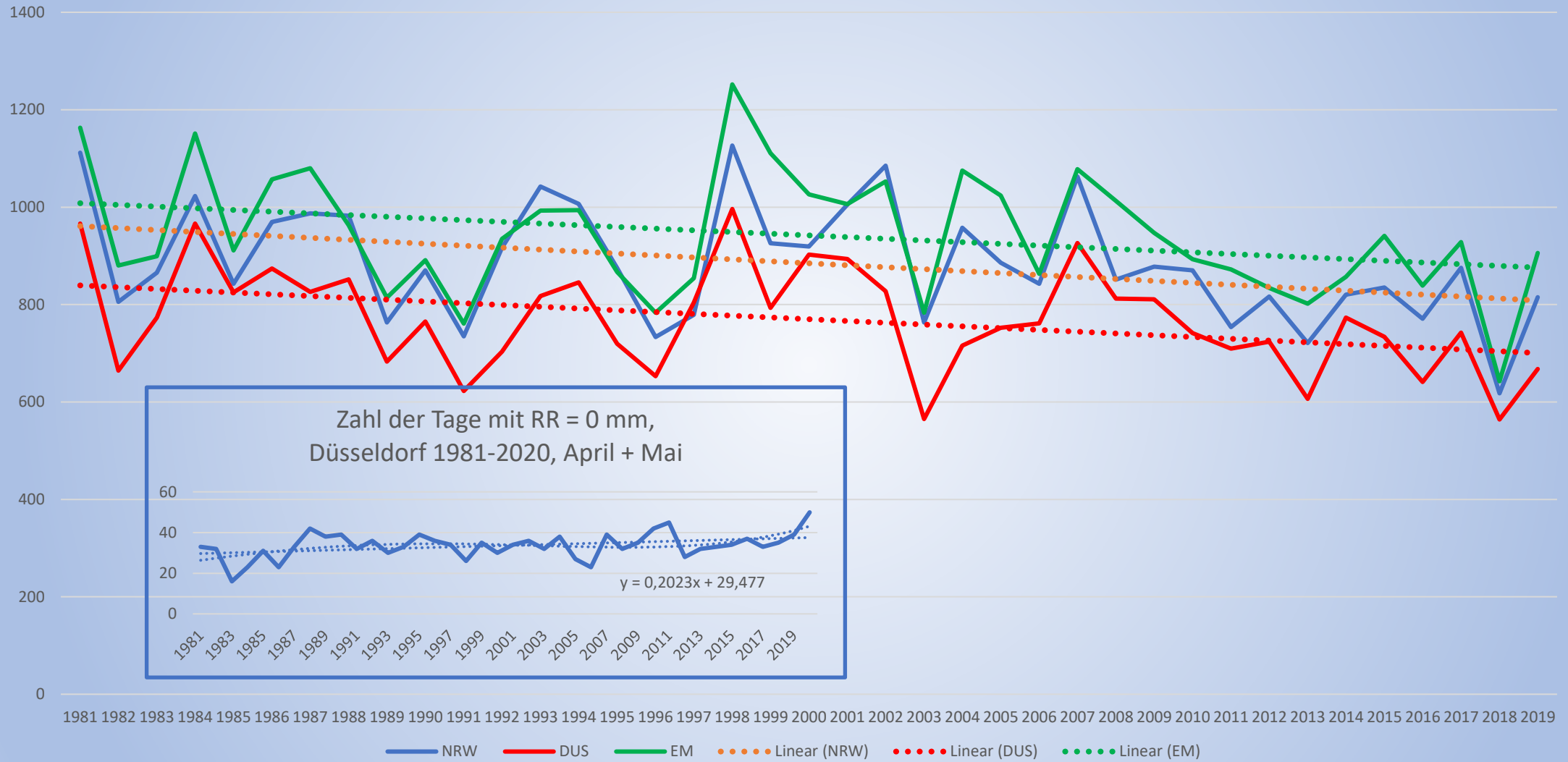
Kritik und Ausblick

U. Otte

Das 2 °C-Ziel kann bei Szenario RCP 2.6 erreicht werden



RR in mm NRW, Düsseldorf, Essen, 1981 - 2019



CO₂-Budget für 1,5 K und 2,0 K

Die Begrenzung der globalen Erwärmung setzt eine Begrenzung der gesamten kumulativen globalen anthropogenen CO₂-Emissionen seit dem vorindustriellen Zeitalter voraus, d. h. das Einhalten eines CO₂-Gesamtbudgets.

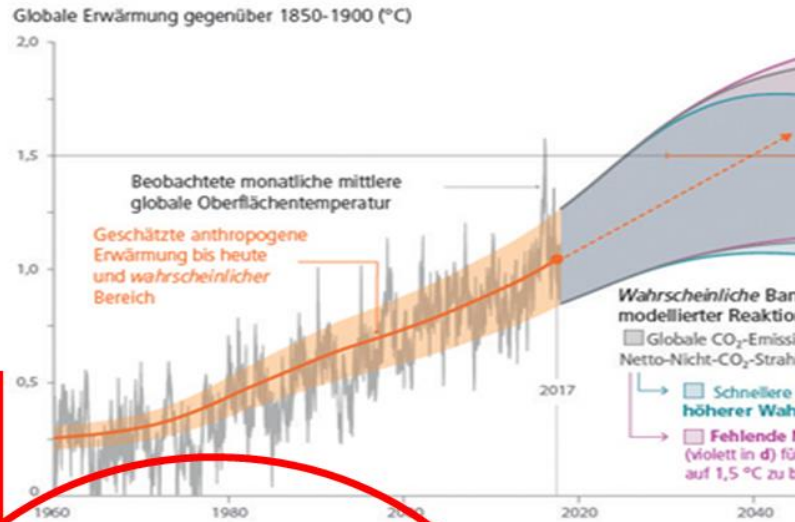
Schätzungen zufolge haben anthropogene CO₂-Emissionen seit dem vorindustriellen Zeitalter das CO₂-Gesamtbudget für 1,5 °C bis Ende des Jahres 2017 um ungefähr $2\,200 \pm 320$ Gt CO₂ verringert. Das entsprechende verbleibende Budget wird derzeit durch aktuelle Emissionen von jährlich 42 ± 3 Gt CO₂ aufgebraucht.

Die Verwendung der globalen mittleren Lufttemperatur in Bodennähe ergibt eine Schätzung des verbleibenden CO₂-Budgets von 580 Gt CO₂ für eine 50-prozentige Wahrscheinlichkeit, die Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen und von 420 Gt CO₂ für eine 66-prozentige Wahrscheinlichkeit. IPCC 2018

Dem IPCC zufolge dürften wir nur noch knapp 420 Gigatonnen CO₂ emittieren, wenn das 1,5 Grad Klimaziel erreicht werden soll. Um das Zwei-Grad-Ziel noch schaffen, bleiben der Menschheit noch 1.070 Milliarden Tonnen CO₂. Sciencexx
Wissensmagazin

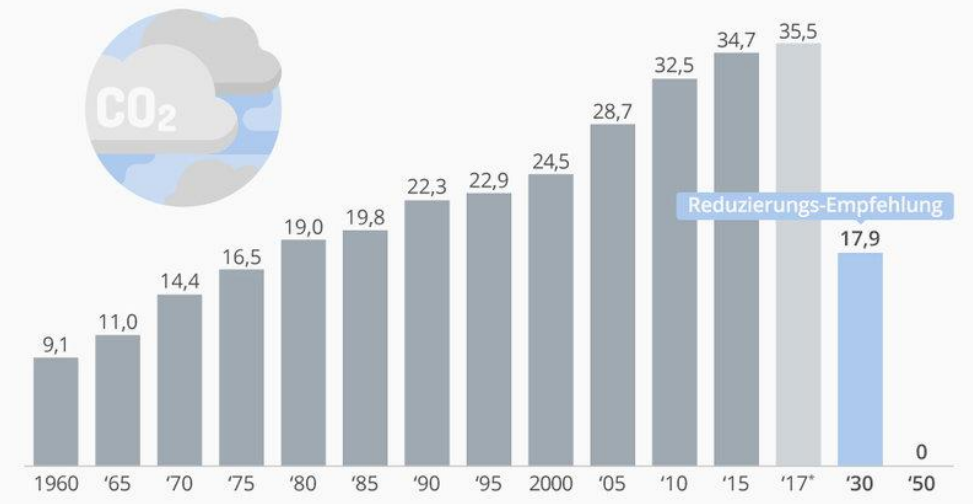
Kumulative CO₂-Emissionen und zukünftiger Strahlungsantrieb durch andere Gase bestimmen die Wahrscheinlichkeit, die Erwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen

a) Beobachtete globale Temperaturänderung und modellierte Reaktionen auf stilisierte anthropogene Emissions- und Strahlungsantriebspfade



So schnell muss die Welt den CO₂-Ausstoß reduzieren

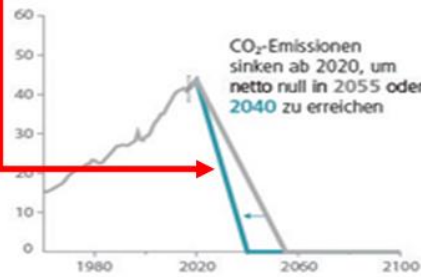
Weltweiter CO₂-Ausstoß bis 2017 und Reduzierungs-Empfehlung des Weltklimarats (in Mrd. t)



realistisch?

b) Stilisierte globale Netto-CO₂-Emissionspfade

Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr (Gt CO₂/Jahr)

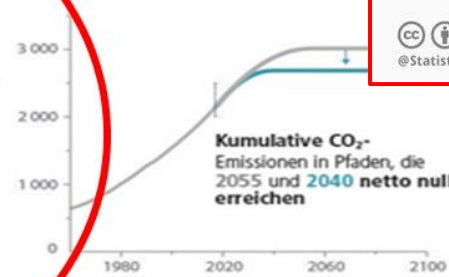


CO₂-Emissionen sinken ab 2020, um netto null in 2055 oder 2040 zu erreichen

Schnellere unmittelbare CO₂-Minderungen begrenzen die in Tafel (c) gezeigten kumulativen CO₂-Emissionen.

c) Kumulative Netto-CO₂-Emissionen

Milliarden Tonnen CO₂ (Gt CO₂)



Kumulative CO₂-Emissionen in Pfaden, die 2055 und 2040 netto null erreichen

Der maximale Temperaturanstieg wird durch die kumulativen Netto-CO₂-Emissionen und den Netto-Nicht-CO₂-Strahlungsantrieb von Methan, Stickstoffdioxid, Aerosolen und anderen anthropogenen Antrieben bestimmt.



nach 2030 gemindert oder fehlende Minderung nach 2030

SR1.5 Abb. SPM.1

IPCC 2018

Transformation auf globaler Ebene

Wege, welche die globale Erwärmung ohne oder mit geringer Überschreitung auf 1,5 °C begrenzen, würden schnelle und weitreichende Systemübergänge in Energie-, Land-, Stadt- und Infrastruktur- (einschließlich Verkehr und Gebäude) sowie in Industriesystemen erfordern. Global! Diese Systemübergänge sind

beispiellos bezüglich ihres Ausmaßes,

aber nicht unbedingt bezüglich der Geschwindigkeit, und setzen einschneidende Emissionsminderungen in allen Sektoren, ein breites Portfolio von Minderungsmöglichkeiten und ein bedeutendes Anwachsen der Investitionen in diese Optionen voraus.

Originaltext
IPCC 2018

Transformation auf globaler Ebene

Klimaschutzbeiträge der Unterzeichnerländer von Paris 2015 reichen deutlich nicht aus, um das 2-Grad-Ziel – geschweige denn das 1,5-Grad-Ziel – zu erreichen. Auch wenn alle angekündigten Versprechen zur Emissionsreduktion eingelöst werden würden, steuert die Welt zurzeit auf eine Erwärmung von 2,2 bis 3,6 Grad Celsius bis zum Jahr 2100 zu (RCP 4.5)

Zielerreichung nur durch globale Emissionsreduktion (fiktiv, ohne Geoengineering), wenn

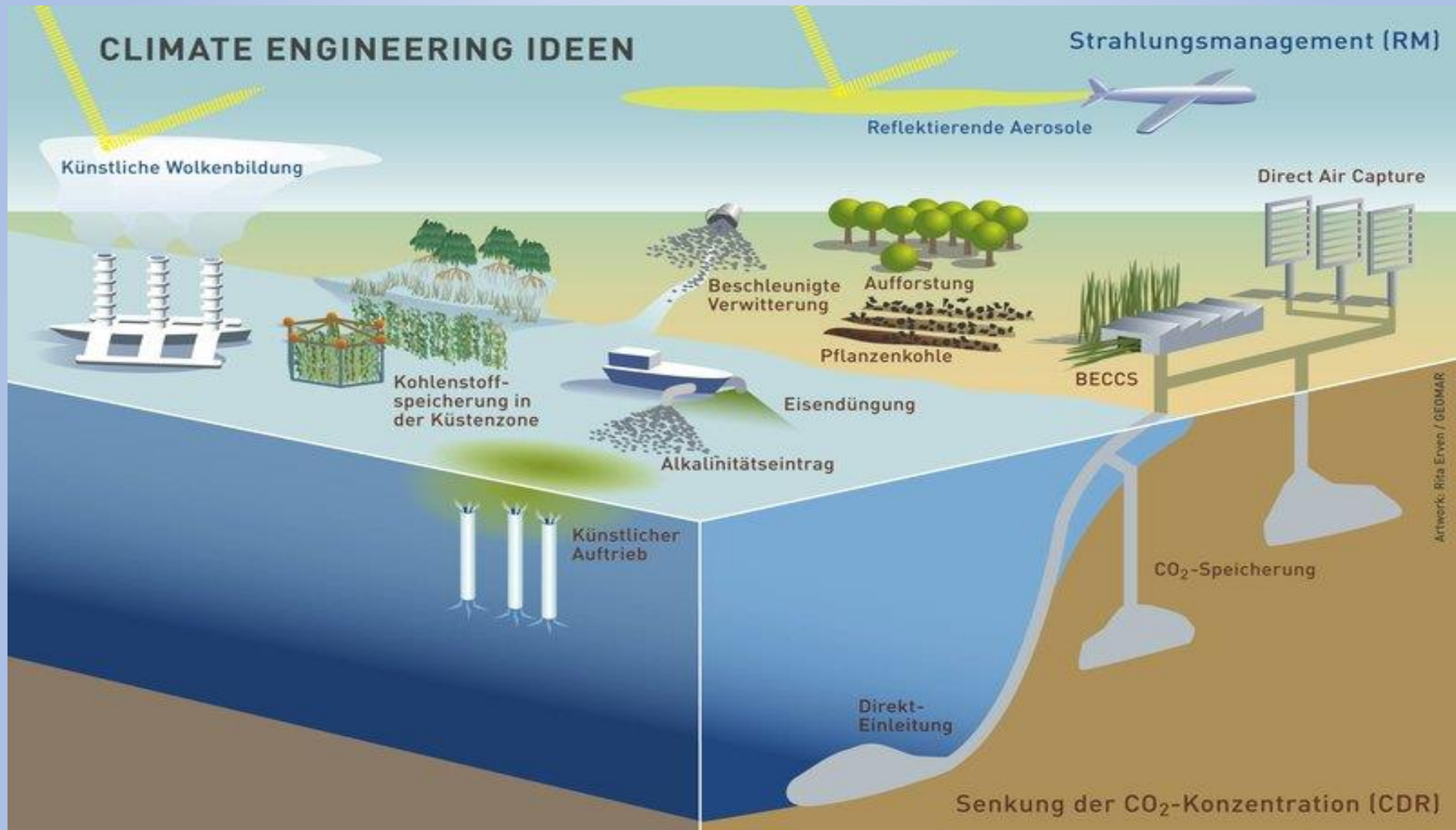
- der Stromsektor vollständig auf erneuerbare Energiequellen umgestellt wird,
- Fahrzeuge, Maschinen und Heizungssysteme elektrifiziert werden,
- Flugzeuge und Schiffe mit kohlendioxid-neutral erzeugtem Treibstoff fliegen bzw. fahren,
- in Industrie und Haushalten nur noch moderne, energieeffiziente Geräte und Materialien zum Einsatz kommen,
- die Lebensmittelproduktion deutlich optimiert wird,
- die Erdbevölkerung deutlich weniger Fleisch verzehrt und keine Nahrungsmittel mehr verschwendet (Ergänzung Otte: bei weiter wachsender Weltbevölkerung, RCP 2.6 ↔ 9 Mrd. Menschen, RCP 8.5 ↔ 12 Mrd.),
- sowie ihr Mobilitätsverhalten verändert,
- die internationale Staatengemeinschaft im Rahmen einer gemeinsamen Strategie eine effektive Klimapolitik betreibt.

Denkbare Konsequenz: Geoengineering, Climate Engineering

- Alle Wege, welche die globale Erwärmung ohne oder mit geringer Überschreitung auf 1,5 °C begrenzen, bedingen die Nutzung von Kohlendioxidentnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR) in einer Größenordnung von 100–1000 Gt CO₂ im Verlauf des 21. Jahrhunderts.
- CDR würde genutzt werden, um verbleibende Emissionen auszugleichen, und um – in den meisten Fällen – netto negative Emissionen zu erzielen, um die globale Erwärmung nach einem Höchststand wieder auf 1,5 °C zurückzubringen.

Kohlendioxidentnahme (Carbon Dioxide Removal, CDR):

Anthropogene Aktivitäten, die der Atmosphäre CO₂ entnehmen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs oder in Produkten lagern. Dazu gehören die bestehende und die potenzielle anthropogene Verstärkung biologischer oder geochemischer Senken und die direkte Abscheidung von Kohlendioxid aus der Luft mit anschließender Speicherung, nicht jedoch die natürliche Aufnahme von CO₂, die keine direkte Folge menschlicher Aktivitäten ist.



a

CH₄, BC,
O₃, etc.

CCU

CCS

b

Verfahren Geoengineering

CO₂

CDR

- 1 | Large-scale afforestation
- 2 | Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)
- 3 | Biochar production and burial
- 4 | Soil carbon enrichment
- 5 | Ocean iron fertilisation (OIF)
- 6 | Enhanced weathering and ocean alkalisation
- 7 | Direct air CO₂ capture and storage (DACCS)

c

RFG



- 8 | Space mirrors
- 9 | Stratospheric aerosol injection (SAI)
- 10 | Cirrus cloud thinning (CCT)
- 11 | Marine sky brightening (MSB)
- 12 | Surface-based brightening

CO₂-Entfernung, CDR

Verfahren

Beschleunigte Verwitterung

Kohlendioxid kann durch die Verwitterung von gezielt ausgebrachten Karbonat- und Silikatgesteinen gebunden werden.

Direct Air Capture

Mit Direct-Air-Capture-Systemen kann CO₂ aus der Umgebungsluft gefiltert werden, wie es Pflanzen und Bäume machen.

Dazu wird die Luft über spezielle Bindemittel geleitet, die das CO₂ aus der Luft filtern, mit anschließender Verflüssigung.

Um das abgetrennte Kohlendioxid der Atmosphäre langfristig zu entziehen, muss es entweder weiterverwendet (Carbon Capture and Usage, CCU) oder unterirdisch gespeichert werden (Carbon Capture and Storage, CCS).

Potenzial/Probleme

Potenzial zur Bindung von Kohlendioxid auf 2 bis 4 Mrd. t jährlich geschätzt – je nach genutzter Fläche und Gesteinsart. Flächenverfügbarkeit problematisch.

Sehr große Anlagen nötig, die extrem viel Energie verbrauchen.

Sinnvoll nur,

- wenn sie mit regenerativen Energien betrieben werden können,
- Speicherkapazitäten (CCS) für das abgetrennte Kohlendioxid aufgebaut bzw. vorhanden sind und/oder
- Konzepte für eine anschließende Nutzung (CCU) entwickelt werden.

CO₂-Entfernung, CDR

Verfahren

Bioenergie und CCS (BECCS)

Kultivierung schnell wachsender Pflanzen, die der Atmosphäre CO₂ entziehen.

Durch Verbrennung in Kraftwerken kann damit Energie gewonnen und das im Verbrennungsprozess freigesetzte CO₂ permanent gespeichert werden. Diese Methode wird als Bioenergie-CCS (BECCS) bezeichnet.

Chinaschilf, Pappeln, Weiden sowie Eukalyptus-Arten sind geeignet. Sie alle liefern in kurzer Zeit viel Biomasse.

In Kombination der Biomasse-Kraftwerke mit CCS ließe sich das bei der Verbrennung wieder frei werdende CO₂ der Umwelt entziehen.

Potenzial/Probleme

Vorteil, dass Energie erzeugt und nicht nur verbraucht wird. BECCS benötigt zum Anbau der Pflanzen jedoch große Landflächen, Wasser und Dünger, steht also im Konflikt mit anderen Landnutzungsformen wie der Landwirtschaft und Nahrungsmittelproduktion.

BECCS spielt eine entscheidende Rolle in den Emissionsszenarien des IPCC zur Erreichung der Klimaziele.

Dies setzt voraus, dass in diesem Ausmaß auch rechtzeitig geologische Speicherstätten erschlossen werden, was zumindest in Deutschland aufgrund großer Widerstände in Politik und Gesellschaft aktuell nur schwer vorstellbar ist. Um eine CO₂-Reduktion der oben erwähnten Größenordnung zu erreichen, wäre für den Anbau von Energiepflanzen eine Landfläche von rund 1 bis 4 Mill. km² nötig – was immerhin bis zu einem Drittel der heutigen weltweiten Ackerfläche entspricht. Fläche Indien 3,3 Mill. Km²; 1,3 Mrd. EW.

CO₂-Entfernung, CDR

Verfahren

Aufforstung von Wäldern

Bereits in den 1970er-Jahren gab es die Idee, die Sahara und andere große Wüsten zu begrünen.

Aufforstung nördlicher Tundra-Gebiete wird seit Langem diskutiert.

Potenzial/Probleme

Nachteile überwiegen. Es müssten große Mengen an Wasser bereitgestellt werden, um die Bäume zu kultivieren. Die Bewässerung wäre vermutlich teurer als heutige Maßnahmen zur Verringerung des CO₂-Ausstosses und würde den regionalen Wassermangel drastisch verschärfen.

Negative Folgen, weil das Vermögen der Erdoberfläche, die Sonneneinstrahlung zu reflektieren, die sogenannte Albedo, verringert wird. Die heutige Tundra ist im Winter von Eis und Schnee bedeckt. Diese weiße Fläche reflektiert die Sonnenstrahlung zum Teil von der Erde zurück ins All. Wälder hingegen erscheinen im Winter dunkler, wodurch sie mehr Wärmestrahlung aufnehmen. Diese Verringerung der Albedo wäre also kontraproduktiv und stünde dem eigentlichen Ziel der Aufforstung der Tundra, das Aufheizen der Erde zu verhindern, entgegen.

CO₂-Entfernung, CDR im Ozean

Verfahren

Beschleunigte Verwitterung

Rund ein Viertel des durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe ausgestoßenen Kohlendioxids wird durch natürliche Prozesse von den Meeren aufgenommen. Dies führt zur Bildung von Kohlensäure und ist verantwortlich für die zunehmende Versauerung des Ozeans.

Die Ozeanversauerung hat weitreichende negative Effekte auf Nahrungsketten und Artenvielfalt.

Der Ozeanversauerung entgegen wirkt die natürliche Verwitterung. Basische Substanzen, zum Beispiel Silikat oder Karbonatgesteinsmehl, direkt ins Oberflächenwasser des Ozeans eingeleitet. Die Materialien können per Schiff aufs Meer transportiert und dort im Wasser verteilt werden. Bei Anwendung dieser Methode könnte der Ozean nicht nur mehr CO₂ aufnehmen. Als positiver Nebeneffekt würde dies zugleich der Ozeanversauerung entgegenwirken.

Potenzial/Probleme

Grundsätzlich weltweit ausreichend Mineralien, um damit alle CO₂-Emissionen zu binden. Potenzial, ab 2050 jährlich zwischen 10 Millionen und 5 Milliarden Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen zu können. Um den weltweiten Kohlendioxid-Ausstoß zu kompensieren, müssten pro Jahr Mineralien in einem Umfang ausgebracht werden, der mit der Menge der heutzutage abgebauten Kohle vergleichbar ist. Hinzu kommt, dass das feine Mineralpulver entweder in Anlagen an Land im Meerwasser gelöst und anschließend ins Meer geleitet oder mit großen Frachtschiffen aufs Meer transportiert werden müsste. In der Summe wäre diese CDR-Methode kostspielig, energieintensiv und auch an Land ein großer Eingriff.

CO₂-Entfernung, CDR im Ozean

Verfahren

Eisendüngung des Ozeans

Pflanzen an Land und Algen im Meer erzeugen Energie mithilfe der Photosynthese. Dabei nehmen sie Kohlendioxid aus der Luft auf.

Allein das pflanzliche Plankton im Meer erbringt etwa die Hälfte der weltweiten Photosynthese-Leistung und nimmt damit insgesamt große Mengen CO₂ aus der Atmosphäre auf.

Über die Nahrungskette gelangt das gespeicherte Kohlendioxid dann in weitere Meeresorganismen wie Kleinkrebse, Fische oder Wale. Sterben die Organismen, sinken sie ab. Ein kleiner Teil der Biomasse sinkt in die Tiefsee, wo sie ins Sediment am Meeresgrund eingelagert wird.

Damit wird ein Teil des ursprünglich im Plankton gespeicherten CO₂ der Atmosphäre für lange Zeit entzogen.

Potenzial/Probleme

In einem Viertel der Weltmeere herrscht ein natürlicher Mangel an Pflanzennährstoffen, insbesondere Eisen.

Entwicklung der Idee einer künstlichen Eisendüngung. Durch Düngung mit relativ kleinen Mengen Eisen ließe sich das Planktonwachstum beschleunigen, sodass die Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre verstärkt würde. Damit könnte letztlich auch mehr Kohlendioxid durch die abgestorbene Biomasse in die Tiefsee transportiert werden.

Funktioniert im Labor und in kleinen Projekten. Um einen globalen Effekt zu erreichen, müsste aber mindestens der gesamte Südliche Ozean permanent mit Eisen gedüngt werden.

Strahlungsmanagement, RM

Verfahren

Sulfat-Aerosole

Verstärkung der reflektierenden Wirkung von Wolken über dem Meer

Schaffung reflektierender Flächen

Satellitengestützte Spiegel im Weltraum

Potenzial/Probleme

Alle Verfahren setzen bei einer Reduzierung der kurzwelligen Strahlung an, obwohl die Ursache der Klimaerwärmung in der zunehmenden langwelligen Strahlung liegt.

Alle Verfahren haben zumindest potenziell starke Nebenwirkungen. So gibt es bei der Methode der Sulfateinbringung in die Stratosphäre Hinweise auf Veränderungen im Niederschlagsgeschehen im globalen Maßstab.

Kompakt

CO₂-Emissionsvermeidung ist alternativlos, aber ist sie auch ausreichend?

Um das Pariser Klimaziel zu erreichen, müssen wir im Jahr 2050 technisch in der Lage sein, einige Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr aus der Atmosphäre zu entfernen. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es keine CDR- oder RM-Methode, die in ausreichend großem Maßstab eingesetzt werden könnte, um die Erderwärmung zu stoppen. Viele Methoden sind bislang rein theoretische Überlegungen, die bestenfalls in kleinen Feldexperimenten getestet wurden.

Es existieren zwei unterschiedliche Strategien: der Atmosphäre Kohlendioxid zu entnehmen oder die Einstrahlung von Sonnenenergie zu verringern. Die unmittelbaren Wirkungsweisen von RM und CDR sind grundsätzlich verschieden:

1. RM greift in den Strahlungshaushalt der Erde ein, um die Erwärmung abzuschwächen, ohne dabei CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen.
2. CDR greift hingegen in den Kohlenstoffkreislauf der Erde ein und hat die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre zum Ziel – geht also die wesentliche Ursache der menschengemachten Erderwärmung an.

CDR- und RM-Methoden sind nur dann klimarelevant, wenn sie in großen Dimensionen zur Anwendung kommen. Auf großer Skala birgt jede der Methoden jedoch bestimmte Risiken.

Offene Fragen

Wer die Erdtemperatur großtechnisch beeinflussen will, greift in Energie- und Stoffkreisläufe des Planeten ein und beeinflusst das gesellschaftlich-politische Gefüge auf schwer vorhersagbare Weise. Damit stellt sich die Frage:

Dürfen wir Menschen Climate Engineering einsetzen, oder sind wir angesichts der für viele Menschen und Ökosysteme bedrohlichen Erderwärmung womöglich sogar dazu verpflichtet?

Welche Argumente sprechen dafür oder dagegen, bestimmte Methoden zu erforschen, zu erproben und einzusetzen?

Die technische Machbarkeit allein reicht für Antworten auf diese Fragen nicht aus.

Entscheidend wird am Ende sein, welche Prioritäten gesetzt werden, wer profitieren soll oder darf und wer nicht. Diese Fragen wiederum sind Wertefragen und damit ein grundlegend ethisches Thema.

Ob bestimmte CE-Methoden zulässig sind oder nicht, wird für jede Methode einzeln auf Grundlage des einschlägigen Völkervertrags- und Völkergewohnheitsrechts beurteilt.

Zwei Anmerkungen aus meiner Sicht:

1. Es wird in Deutschland keine offene Debatte zu diesem Thema geführt.
2. Sind liberal-demokratische und zudem föderale Staats- und Gesellschaftssysteme in der Lage, die große Transformation zu einer dekarbonisierten Welt zu bewerkstelligen? Die systemische Ineffizienz in D erleben wir ja ganz aktuell.

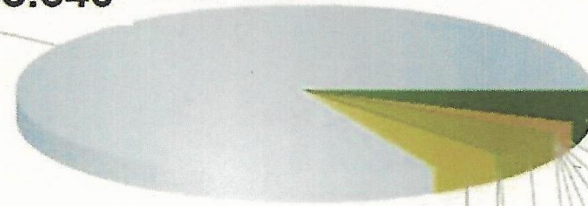
Deutscher Föderalismus nach 1648



Deutsches
Historisches
Museum

DIE GESELLSCHAFT BESTIMMT DAS RISIKO MIT SEINER WAHRNEHMUNG

Deutschland
43.640



Alle anderen EU-Staaten
zusammen 9.300

- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (United Kingdom), 26
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Switzerland), 3,200
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Spain), 831
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Romania), 16
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Netherlands), 102
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Luxembourg), 20
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Liechtenstein), 62
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Italy), 133
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (France), 2,519
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Cyprus), 12
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Belgium), 176
- Fukushima & Atomausstieg in Rest-EU (Austria), 2,170

Presseartikel „nach Fukushima“: Stand 14.04.2011

Quelle: U. Gräber AREVA, SMM 13.4.2011

**Komponente einer
Deutschen Leitkultur**

25. April 2019 auf der A8 bei Stuttgart



10% weniger LKW-
Transporte
bedeuten 40%
mehr
Transportkapazität
auf der Bahn

Wahrscheinlich bei
unserem Umgang
mit Infrastruktur-
projekten?

6. Oktober 2019 in Ratingen



Hier hat immerhin die Abfalltrennung funktioniert, zudem noch in Mehrfachkartons mit korrekter Beschriftung.

Dennoch – bei der Nachhaltigkeit müssen wir nachsteuern, nur wie?