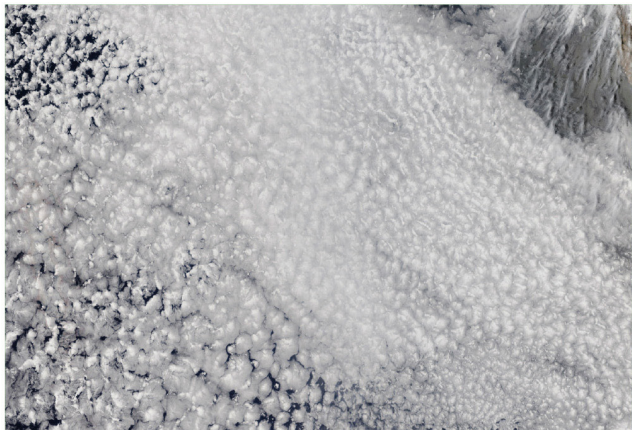




# WARNSIGNAL KLIMA

## Hilft Technik gegen die Erderwärmung?

Climate Engineering in der Diskussion

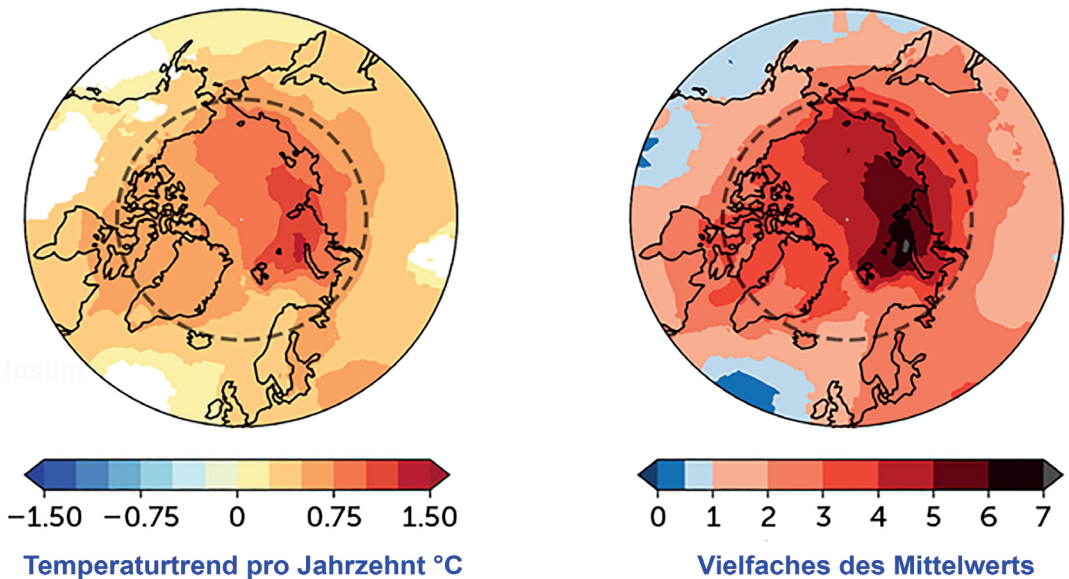


## Tafel 1: Raschere globale Erwärmung und noch stärkere Vervielfachung in hohen Breiten

Die Erdoberfläche erwärmt sich immer schneller. Auch die frühere Aussage „Die Arktis erwärmt sich zwei bis drei Mal rascher“ gilt nicht mehr.

In den letzten vier Jahrzehnten stieg die mittlere globale Lufttemperatur an der Erdoberfläche um etwa  $0,2^{\circ}\text{C}$  pro Jahrzehnt, aber in der Arktis um etwa  $0,75^{\circ}\text{C}$  (links). In einigen Gebieten sogar bis zu sieben Mal so schnell wie im globalen Mittel (rechts).

Die grau gestrichelte Linie zeigt den Verlauf des Polarkreises



Aus: Rantanen, M. et al. (2022): The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979  
<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>. Lizenz ist CC BY

Der Generalsekretär der Vereinten Nationen, António Guterres, sagte zurecht auf COP27 in Scharm El-Scheich am 06.11.2022:

**»Wir sind auf dem Highway zur Klimahölle - mit dem Fuß auf dem Gaspedal«**

*Die Menschheit hat die Wahl:*

**»Entweder Kooperieren oder Untergehen«**

## **Tafel 2: Kippelemente des Klimasystems und Climate Engineering**

Mehrere Kippunkte im Klimasystem könnten ihren Schwellenwert schon bei 1,5° bis 2°C mittlerer Erwärmung erreichen\*: das Abschmelzen des grönländischen und des westantarktischen Eisschildes, mit einer Erhöhung des Meeresspiegels um jeweils einige Meter, das Absterben von Korallenriffen in den Tropen sowie das verbreitete Auftauen von Permafrostböden mit der Freisetzung des dort gespeicherten Kohlenstoffs in die Atmosphäre als Kohlendioxid und Methan. Derzeit steuert die Welt auf eine globale Erwärmung von ~2° bis 3°C zu; im besten Fall, wenn alle Zusagen und national festgelegten Beiträge umgesetzt werden, könnte es für knapp unter 2°C reichen.

### **Beispiel: Verlust des grönländischen Eisschildes\***

Das stark zunehmende Schmelzen des Schnees an der Oberfläche im Sommer auch in den höchsten Regionen des grönländischen Eisschildes und das raschere Kalben der großen Auslassgletscher sind Frühwarnsignale dafür, dass sich Westgrönland einem Kippunkt nähert. Sowohl die Modellierung von Eisschilden als auch Daten der Klimageschichte deuten darauf hin, dass der Kippunkt des grönländischen Eisschildes erreicht wird, wenn die Schnee- und Eisschmelze im Sommer so stark ist, dass sie die sich selbst beschleunigende Schmelze des Eisschildes unterstützt. Denn bei niedrigerer Eisschildoberfläche und damit wärmerer Luft schmilzt das Eis noch schneller.

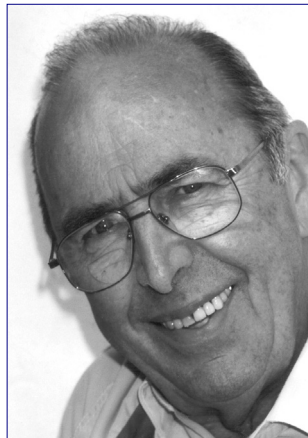
Der Weltklimarat (IPCC) hält die Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre für notwendig, um das Ziel des Paris-Abkommens »mittlere globale Erwärmung wesentlich unter 2°C« noch zu erreichen.

*\*Armstrong McKay, D. I., A. Staal, J. F. Abrams, R. Winkelmann, B. Sakschewski, S. Loriani, I. Fetzer, S. E. Cornell, J. Rockström & T. M. Lenton (2022): Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. Science 377, 1171.*

---

***Das Buch wird Prof. Dr. Peter Hupfer zu seinem 90. Geburtstag gewidmet***

Die Herausgeber widmen das Buch Herrn Prof. Dr. Peter Hupfer zu seinem 90. Geburtstag am Welttag der Meteorologie 2023. Bis zum Ruhestand im Jahr 1998 war er Professor für Klimatologie an der Humboldt-Universität zu Berlin. Er hatte nach der Wiedervereinigung maßgeblichen Einfluss auf die Zusammenführung der Klimaforschung in beiden deutschen Staaten u.a. durch die Mitorganisation der Deutsch-Deutschen Klimatagungen. Er hat mehrere Lehrbücher der Klimatologie geschrieben und sich in den letzten Jahren besonders historischen Themen der maritimen Meteorologie gewidmet. Er war Mitherausgeber von 6 Büchern unserer Reihe „Warnsignal Klima“ und ist weiterhin als Gutachter der Reihe aktiv. (Foto: K. Deutscher, 2001).



---

**Herausgeber:**

José L. Lozán • Hartmut Graßl • Siegmund-W. Breckle • Dieter Kasang • Markus Quante

**Wissenschaftliche Fakten**

**WARNSIGNAL KLIMA:  
Hilft Technik gegen die Erderwärmung?**

Mit 156 Abbildungen, 22 Tabellen und 5 Tafeln

**Wissenschaftliche Auswertungen** In Kooperation mit **GEO**

## Adresse der Herausgeber:

Dr. José L. Lozán  
Wissenschaftliche Auswertungen  
Asbrookdamm 11b • D-22115 Hamburg  
jl-lozan@t-online.de

Prof. Dr. Markus Quante  
Helmholtz-Zentrum hereon GmbH  
Max-Planck-Straße 1 • D-21502 Geesthacht  
markus.quante@hereon.de

Prof. Dr. Hartmut Graßl  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg  
Bundesstraße 53 • D-20146 Hamburg  
hartmut.grassl@mpimet.mpg.de

Prof. i. R. Dr. Siegmund-W. Breckle  
Ökologie Bielefeld •(ex)Universität Bielefeld  
sbreckle@uni-bielefeld.de

Dr. Dieter Kasang  
Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg  
Bundesstraße 45a • D-20146 Hamburg  
kasang@dkrz.de

## Veröffentlicht in Kooperation mit

GEO Das Reportage Magazin • Am Baumwall 11 • D-20459 Hamburg

**Gedruckt mit Unterstützung von:** Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Nuklearsicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) • Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht • Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrages, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der Fassung vom 26. November 2020 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

### Direkte Bestellung:

Büro: »Wissenschaftliche Auswertungen«  
Asbrookdamm 11b • D-22115 Hamburg • Deutschland  
Tel. (+49) (0)40-4304038 - Mobil: 0176-49261792  
jl-lozan@t-online.de  
www.warnsignal-klima.de  
www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de

(c) Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg  
ISBN: 39820067-6-5 EAN 978-39820067-65  
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Deutsche Bibliothek - CIP

Warnsignal Klima: Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Wissenschaftliche Fakten  
Mit 156 Abbildungen / José L. Lozán ... (Hrsg.)  
Verlag Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg  
2023. ISBN:39820067-6-5 NE:Lozán, José L. [Hrsg.]  
2023.EAN:978-39820067-65 NE:Lozán, José L. [Hrsg.]

### Titelseite - Fotos-Nachweis

**Oben links:** Climeworks Anlage - Direct air carbon capture (DACC) ORCA (Island). Copyright frei.

**Oben rechts:** Holzkohle zur Kohlenstoffspeicherung in Böden (Foto: Andreas Möller). Mit seiner freundlichen Genehmigung.

**Unten rechts:** Satellitenbild (NOAA-20) von einem Stratocumulusfeld vor der südamerikanischen Küste. Copyright frei.

**Unten links:** Angepflanzte Mangroven NeuKaledonien (Foto: S.-W. Breckle). Mit seiner freundlichen Genehmigung.

Das Buch erscheint auch elektronisch  
([www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de)) als open access  
und unter Creative-Commons-Lizenz (CC BY-NC-ND).

Satz: Dr. J.L.Lozań (InDesign CS6)  
Druck und Bindung:  
CPI books GmbH  
Ulm

---

## Vorwort

---

Der von 196 Staaten und der EU am 12. Dezember 2015 in Paris beschlossene und seit 4. November 2016 völkerrechtlich bindende Vertrag hat das Ziel, den Klimawandel zu bremsen und die Auswirkungen abzumildern. Dafür muss die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit begrenzt werden. Man soll sogar versuchen, die Erderwärmung auf möglichst 1,5°C zu beschränken.

Da die globalen Emissionen von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen trotzdem im letzten Jahrzehnt im Mittel weiter ansteigen und auch in Europa nicht stark genug sinken, ist die Gefahr, dass das Ziel des Paris-Abkommens nicht erreicht wird, recht hoch. Zurzeit beträgt die globale mittlere Erderwärmung bereits fast 1,2°C und man rechnet damit, dass die mehrjährig gemittelte Erderwärmung bereits vor 2050 über 1,5°C liegen könnte, wenn die Emissionen der klimarelevanten Gase zunächst noch weiter leicht ansteigen. Der Weltklimarat IPCC betrachtet die konsequente und rasche Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen als wichtigste Maßnahme zum Schutz des Klimas. Auf der 27. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention (COP 27) in Scharm El-Scheich (Ägypten) im November 2022 wurde mehrfach an alle Staaten appelliert, ihre Anstrengungen zu erhöhen, um ihre Emissionen entsprechend ihrer völkerrechtlichen Verpflichtung zu reduzieren.

Der IPCC hält inzwischen neben der drastischen Reduktion der Emissionen auch die Entfernung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre (*Carbon Dioxide Removal* - CDR) für notwendig, um das o.g. Ziel noch zu erreichen. Aus diesem Grund stehen im Gegensatz zu den vorigen Bänden dieser Buchreihe hier technische Methoden und ihr möglicher Beitrag gegen die Erderwärmung im Mittelpunkt. Zu diesen Methoden gehören z.B. Renaturierung von Feuchtgebieten (Mooren und Auen sowie Mangroven), Wiederaufforstungen oder Aufforstungen, verstärkte Humusbildung in Böden oder beschleunigte Verwitterung im Meer und an Land. Diese Verfahren sollen die natürlichen geo-ökologischen Prozesse im Kohlenstoffkreislauf weltweit verstärken. Der beste Weg Klima- und Artenschutz zu kombinieren, ist die Abholzung zu stoppen und die Aufforstung nicht nur in den Tropen und Subtropen erheblich zu steigern. Die dauerhafte Bindung von Kohlenstoff in der Biomasse und im Humus der Böden durch eine regenerative Land- und Forstwirtschaft muss in Zukunft durch sinnvolle Nutzungen ergänzt werden wie die Nutzung von Holz im Bausektor. Damit wird der auf der Erde wirkungsvollste Mechanismus der Kohlenstoffbindung, die Photosynthese, eingesetzt, um den gebundenen Kohlenstoff in langfristigen Produkten und Gebäuden zu speichern.

Es gibt eine weitere Gruppe von Verfahren, die mehr Sonnenenergie in den Weltraum zurückstreuen oder der Durchlässigkeit für Wärmestrahlung erhöhen sollen. Sie wirken als Klimaschutz, ohne dabei allerdings die Konzentration der klimarelevanten Gase zu mindern. Diese Verfahren werden Radiation Management (RM) genannt. CDR und RM werden oft auch als Climate Engineering bezeichnet. Früher wurde Climate Engineering auch Geo-Engineering genannt. Vor allem die RM-Verfahren befinden sich noch fast alle in der Forschungsphase. Neben den gewünschten Auswirkungen bergen diese aber auch erhebliche Risiken und Unsicherheiten. Ihre jeweilige Effizienz, insbesondere aus globaler Sicht, ist noch völlig offen.

Neben den Climate Engineering-Methoden gibt es Verfahren zur Nutzung des Kohlenstoffdioxids (*Carbon Capture and Utilisation* – CCU). Eine konkrete Möglichkeit dafür ist das CO<sub>2</sub> durch Karbonatisierung (oder Mineralisierung) dauerhaft in ein klimaneutrales Produkt umzuwandeln wie Kalk (Kalziumkarbonat CaCO<sub>3</sub>) umzuwandeln. Diese CO<sub>2</sub>-Mineralisierung könnte wegen der dauerhaften Speicherung einen Beitrag zur Lösung des Klima-Problems leisten. Das Kalziumkarbonat hat potenziell eine vielseitige Verwendung z.B. in Baustoffen, Füllstoffen und Zementzusätzen.

Ferner kann CO<sub>2</sub> als Rohstoff zur Produktion beispielsweise von Kunststoffen oder synthetischen Kraftstoffen verwendet werden. Die Speicherungszeit des CO<sub>2</sub> ist bei diesen Produkten oft nicht langfristig. In einigen Industriebranchen wie in der Zement-, Kalk- und Glasindustrie entstehen Treibhausgasemissionen, die nach dem aktuellen Wissensstand auch in Zukunft wahrscheinlich nicht vermeidbar sind. Dort wird daher CCU als mögliche Lösung diskutiert. Auch durch Landnutzungen z.B. beim Anbau von Reis oder der Rinderhaltung sind Emissionen unvermeidbar. Um Treibhausgasneutralität zu erreichen, werden daher technische Verfahren eine Rolle spielen müssen.

---

Im Gegensatz zu den CDR-Methoden, die das Ziel haben, das CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu holen oder nicht dorthin gelangen zu lassen, ist das Hauptziel der Dekarbonisierung in der Industrie die CO<sub>2</sub>-Emissionen während der industriellen Prozesse zu vermeiden oder wenigstens zu reduzieren. Dekarbonisierung in der Industrie sowie die CCU gehören nicht zu den Climate Engineering Methoden; sie werden im Buch als Ergänzung behandelt. Ohne eine starke Dekarbonisierung in der Industrie ist Treibhausgasneutralität bis 2045-2050 nicht zu erreichen.

Aus den o.g. Gründen wird Climate Engineering verstärkt auch in den Medien diskutiert. Bei einer unkritischen Betrachtung besteht die Gefahr, dass es zunehmend als die Rettung vor weiterer rascher Erwärmung betrachtet wird und dadurch die Maßnahmen zur Emissionsminderung vernachlässigt werden.

Der 21. Band dieser Buchreihe erscheint kurz nach der COP27 (November 2022) in Ägypten, in dem der Generalsekretär der Vereinten Nationen, António Guterres, zurecht sagte: »*Wir sind auf dem Highway zur Klimahölle - mit dem Fuß auf dem Gaspedal*«. Die Menschheit hat die Wahl: »*Entweder Kooperieren oder Untergehen*«. Das Jahr 2022 war auch klimatisch gesehen dramatisch: Pakistan wurde aufgrund ungewohnt starker Monsun-Regenfälle durch eine große Flutkatastrophe heimgesucht, Ein Drittel des Landes 265.000 km<sup>2</sup> (Fläche Deutschlands 357.000 km<sup>2</sup>) stand unter Wasser, mehr als 1.500 Menschen starben und Millionen waren auf der Flucht vor dem Wasser. In Afrika leiden viele Regionen unter einer andauernden Dürre und der schlimmsten Nahrungsmittelkrise seit 40 Jahren. Nach Angabe der Welthungerhilfe sind 278 Mio. Menschen betroffen. Besonders in Madagaskar, dem Südsudan, in Kenia, in einigen Gebieten Äthiopiens, aber auch in Sambia oder Somalia hungern Millionen Menschen.

Die meisten Länder nehmen Klimaschutz noch immer nicht ernst genug. Junge Aktivisten in diesen Ländern, allen voran die Fridays for Future-Bewegung bemühen sich um politischen Einfluss. Im Jahr 2021 ist eine weitere Gruppe, »Letzte Generation«, entstanden, die sich aufgrund zu geringer Klimaschutzmaßnahmen radikalisiert haben.

Wie die anderen Bände der Buchreihe »Warnsignal Klima« richtet sich dieses Buch auch an Schüler/innen und Lehrer/innen sowie Studierende und Wissenschaftler/innen aller Fachrichtungen sowie an interessierte Laien, aber auch an Entscheider in Politik und Wirtschaft. Das Buch enthält rund 50 Artikel in sieben Kapiteln. Es beginnt mit Bedeutung und Geschichte des Climate Engineering. Im Kapitel 2 werden die Kohlendioxidentnahme aus der Atmosphäre (CDR) und andere sogenannte negative Emissionstechnologien behandelt. Kapitel 3 beschreibt die Methoden zur CO<sub>2</sub>-Nutzung (CCU). Im Mittelpunkt des Kapitels 4 stehen die Methoden zur Dekarbonisierung in der Industrie, insbesondere in der Zement- und Stahlindustrie. Das Strahlungsmanagement (RM) ist das Thema des Kapitels 5. Im Kapitel 6 wird über die Akzeptanz der technischen Methoden zum Klimaschutz in der Gesellschaft berichtet. Das abschließende Kapitel 7 gibt Teilantworten auf die Frage »Was wird getan?«.

Insgesamt haben rund 70 Wissenschaftler/innen aus vielen Forschungseinrichtungen in Deutschland und benachbarten Ländern beigetragen. Wir wollen mit diesem Buch die Debatte bereichern, wie wir das Ziel des Paris-Abkommens noch erreichen können und welche technische Methoden wichtig werden könnten. Wir hoffen, damit Grundlagen für politische Entscheidungsprozesse bereitzustellen.

Wir danken in erster Linie den Autorinnen und Autoren der einzelnen Beiträge und dem Gutachterkreis für die kritische Durchsicht der Texte sowie die Anregungen zu deren Verbesserung. Unser Dank gilt auch Heidi Escher-Vetter und Lubica Kasang für ihre Unterstützung als Lektorinnen. Unser Buch erscheint auch elektronisch ([www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de)) als *open access* und unter *Creative-Commons-Lizenz* (CC BY-NC-ND). Das wurde durch die Unterstützung des Open Access Publikationsfonds des Alfred-Wegener-Instituts Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung ermöglicht.

Frühjahr 2023 - Die Herausgeber



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<i>Vorwort</i>	5
<i>Liste der Autorinnen/Autoren und der Gutachter</i>	9
<i>Hilft Technik gegen die Erderwärmung? Versuch einer ersten Bewertung (Die Herausgeber)</i>	11
<b><u>1. Bedeutung und Geschichte von Climate Engineering</u></b>	<b>19</b>
1.1 Das Pariser Klimaabkommen und die Bedeutung von Climate Engineering (Andreas Oschlies)	19
1.2 Globaler Kohlenstoffkreislauf – Wieviel CO <sub>2</sub> bleibt jährlich in der Atmosphäre und wieviel Zeit haben wir noch? (Dieter Kasang)	24
1.3 Vom Regenmachen zur Klimaintervention - Ein Blick auf die Ideen- und Entwicklungsgeschichte des Climate Engineering (Markus Quante, Blaž Gasparini & Boris Belge)	34
<b><u>2. Kohlendioxidentnahme aus der Atmosphäre - Negative Emissionstechnologien (Carbon Dioxide Removal, CDR)</u></b>	<b>43</b>
2.0 Übersicht der Maßnahmen zur Verringerung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre (Carbon Dioxide Removal, CDR) (José L. Lozán & Hartmut Graßl)	43
<b><u>2.1 Biologisch basierte Verfahren</u></b>	<b>49</b>
2.1.1 Aufforstung, Wiederaufforstung und nachhaltige Waldbewirtschaftung für die Klimawandelmitigation (Wolfgang Obermeier, Sabine Egerer & Julia Pongratz)	49
2.1.2 Wiedervernässungen und Renaturierung der Moore als Beitrag zum Klimaschutz (Siegmar-W. Breckle)	57
2.1.3 Renaturierung und Aufforstung von Mangroven-Wäldern und ihre Bedeutung als CO <sub>2</sub> -Senken (Thomas Fickert)	65
2.1.4 Flussauen: Renaturierung und ihre Bedeutung als CO <sub>2</sub> -Senken (Detlef Günther-Diringer)	73
2.1.5 Neue synthetisch-biologische Wege zur CO <sub>2</sub> -Fixierung (Tobias J. Erb & Andreas P. M. Weber)	79
2.1.6 Ozeandüngung zur CO <sub>2</sub> -Speicherung durch Mikroalgen (Lina Teckentrup)	85
2.1.7 Mikroorganismen für eine kreislauforientierte Bioökonomie zur CO <sub>2</sub> -Entnahme aus der Atmosphäre und zur Minderung der Umweltverschmutzung (Garabed Antranikian & Wolfgang R. Streit)	90
2.1.8 Sequestrierung und Speicherung von Kohlenstoff im Meer durch <i>Sargassum</i> -Aquakulturen (Mar Fernández Méndez, Julia Schnetzer & Victor Smetacek)	96
2.1.9 CO <sub>2</sub> -Reduzierung an der Küste: Was können Salz- und Seegraswiesen leisten? (Tobias Dolch & Ketil Koop-Jakobsen)	103
<b><u>2.2 Geochemisch &amp; technisch basierte Verfahren</u></b>	<b>110</b>
2.2.1 Technische Verfahren zur CO <sub>2</sub> -Entnahme aus der Atmosphäre und Speicherung im Untergrund oder in langlebigen Produkten (Roland Dittmeyer & Benjamin Dietrich)	110
2.2.2 CCS (Carbon Capture and Storage): CO <sub>2</sub> -Speicherung unter der Nordsee (Klaus Wallmann)	120
2.2.3 Konzept, Potenzial und Risiken von BECCS (Bioenergy with Carbon Capture & Storage) (Andreas Krause, Wolfgang Obermeier & Anja Rammig)	126
2.2.4 Pflanzenkohlesysteme zur Kohlenstoffspeicherung in Böden (Arthur Groß, Andreas Möller & Bruno Glaser)	133
2.2.5 Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden (Siegmar-W. Breckle & Martin Wiesmeier)	143
2.2.6 Künstlicher Auftrieb: Anschlag für marine Ökosysteme (Ulf Riebesell)	149
2.2.7 Bedeutung des Grünlandes für das Klima: Hohe Albedo, Resilienz und Langzeitkohlenstoffspeicherung (Vicky M. Temperton)	155
2.2.8 Beschleunigte Verwitterung an Land (Thorben Amann & Jens Hartmann)	161
2.2.9 Ozean Alkalinisierung (Dieter A. Wolf-Gladrow, Sonja Geilert, Michael Fuhr & Jens Hartmann)	167
2.2.10 Alternativer Baustoff Holz? (Peter-Diedrich Hansen & Rainer vom Lehn)	173

<b>3. <u>CO<sub>2</sub>-Nutzung (Carbon Capture and Utilisation, CCU)</u></b>	<b>179</b>
3.1 Wichtige CO <sub>2</sub> -Quellen und -Abscheidetechnologien (Dieter Kasang)	179
3.2 Direkte Nutzung von CO <sub>2</sub> (Dieter Kasang)	182
3.3 Industrielle CO <sub>2</sub> -Nutzungen: Ein Überblick (José L. Lozán & Christina Wulf)	187
3.4 CO <sub>2</sub> -Nutzung zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe (Christina Wulf & José L. Lozán)	193
3.5 Kunststoffe: Schäume und Fasern aus CO <sub>2</sub> – Anmerkungen (Jan Oliver Löfken)	198
3.6 Ist CCU treibhausgasneutral? Eine Bewertung (José L. Lozán & Hartmut Graßl)	201
<b>4. <u>Dekarbonisierung in der Industrie</u></b>	<b>206</b>
4.1 Grüne Stahlproduktion ohne Kohle (Stefan Lechtenböhrer)	206
4.2 CO <sub>2</sub> -Reduktion in der Zement- und Kalkindustrie - Wie vermeidet man unvermeidbare Emissionen ? (Erika Bellmann)	215
<b>5. <u>Das Strahlungsmanagement (Radiation Management, RM)</u></b>	<b>222</b>
5.1 Das Strahlungsmanagement im Climate Engineering - Ein Überblick (Markus Quante & Thomas Leisner)	222
5.2 Künstlich aufgehellte Oberflächen zur Albedoerhöhung (Thomas Foken)	231
5.3 Abkühlung durch starke vulkanische Eruptionen und ihre Nebeneffekte (Claudia Timmreck)	237
5.4 Eine künstliche stratosphärische Schwefelschicht: Der einfache Ausweg aus dem Klimaproblem? (Ulrike Niemeier)	243
5.5 Impfen von Wolken zur Erhöhung der Reflektivität - Konzepte, Potenziale und Risiken (Anna Possner, Johannes Quaas & Markus Quante)	250
5.6 Ausdünnung von Zirren, um dem Klimawandel entgegenzuwirken ? (Blaž Gasparini, Markus Quante & Ulrike Lohmann)	256
<b>6. <u>Climate Engineering (CE) und Gesellschaft</u></b>	<b>264</b>
6.1 Steuerung und Regulierung von CE als Herausforderung für Recht, Politik und Gesellschaft (Dana Ruddigkeit & Larissa Kleiner)	264
6.2 Climate Engineering im Urteil von Experten und der öffentlichen Meinung (Dieter Kasang)	270
6.3 Gemeinwohlorientierte staatliche Steuerung der Forschung von Climate Engineering Techniken – das Model London Protokoll (Harald Ginzky & Andreas Oschlies)	275
6.4 Neun Thesen zur Ethik vom Climate Engineering (Lukas Tank, Frederike Neuber & Christian Baatz)	280
6.5 Völkerrechtliche Herausforderungen des Climate Engineering - Einordnung und Ausblick (Eva Sinemus & Nicole Herold)	286
6.6 Wirtschaftliche Aspekte bei der atmosphärischen CO <sub>2</sub> -Entnahme und dem Strahlungsmanagement (Wilfried Rickels)	291
6.7 CE-Anwendung: Ein Problem für Frieden und Sicherheit (P. Michael Link, Jasmin S. A. Link & Jürgen Scheffran)	298
<b>7. <u>Was wird getan ?</u></b>	<b>305</b>
7.1 Der lange Weg bis zu Äußerungen in völkerrechtlich bindenden Umweltabkommen zu technischen Eingriffen in das Klimasystem (Hartmut Graßl)	305
7.2 Es ist noch nicht zu spät: Konkrete Lösungen für konkrete Probleme (Heike Zimmermann-Timm, Karl Kienzl & Lukas Kienzl)	309
7.3 Naturbasierte Lösung für Klimaschutz und mehr (Friederike Erxleben)	314
<b>8. <u>Glossar: Erläuterung der Fachbegriffe</u></b>	<b>320</b>
<b>9. <u>Sachregister</u></b>	<b>324</b>

---

## Listen der Autorinnen, Autoren und Gutachter

---

### *Autoren / Autorinnen*

Thorben Amann, Universität Hamburg, Institut für Geologie, CEN  
Garabed Antranikian, Technische Universität Hamburg, Center for Biobased Solutions (CBBS)  
Christian Baatz, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Philosophische Fakultät  
Boris Belge, Universität Basel, Department Geschichte (Schweiz)  
Erika Bellmann, Beraterin zu Carbon Management, Berlin  
Siegmar-W. Breckle, Universität Bielefeld, Ökologie Bielefeld  
Benjamin Dietrich, Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) - Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Roland Dittmeyer, Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT) - Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Tobias Dolch, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)  
Sabine Egerer, Department für Geographie, Ludwig-Maximilians-Universität München  
Tobias J. Erb, Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie, Marburg,  
Friederike Erxleben, Umweltbundesamt (UBA), Berlin  
Mar Fernández Méndez, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)  
Thomas Fickert, Naturschutzreferent DAV, Landesverband Baden-Württemberg  
Thomas Foken, Universität Bayreuth, Zentrum für Ökologie und Umweltforschung  
Michael Fuhr, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel  
Blaž Gasparini, Universität Wien, Institut für Meteorologie und Geophysik (Österreich)  
Sonja Geilert, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel  
Harald Ginzky, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau  
Bruno Glaser, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften  
Hartmut Graßl, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg  
Arthur Groß, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften  
Detlef Günther-Diringer, Hochschule Karlsruhe, Umwelt- und Geoinformationsmanagement  
Peter-Diedrich Hansen, Institut für Ökologie, TU Berlin REM, Real Estate Management  
Jens Hartmann, Universität Hamburg, Institut für Geologie, CEN  
Nicole Herold, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Walther-Schücking-Institut für Internationales Recht  
Dieter Kasang, Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ), Hamburg  
Karl Kienzl, CEOs for FUTURE, Wien (Österreich)  
Lukas Kienzl, CEOs for FUTURE, Wien (Österreich)  
Larissa Kleiner, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau  
Ketil Koop-Jakobsen, The Ecosystems Center, Marine Biological Laboratory, Woods Hole, Massachusetts (USA)  
Andreas Krause, Technische Universität München, TUM School of Life Sciences Weihenstephan  
Stefan Lechtenböhrer, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie  
Thomas Leisner, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Aerosol Forschung (KIT)  
P. Michael Link, Universität Hamburg, Institut für Geographie, CEN  
Jasmin S. A. Link, Universität Hamburg, Institut für Geographie, CEN  
Jan Oliver Löffken, Wissenschaft Aktuell, Hamburg  
Ulrike Lohmann, ETH Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima (Schweiz)  
José L. Lozán, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg  
Andreas Möller, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover  
Frederike Neuber, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Philosophische Fakultät  
Ulrike Niemeier, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg  
Wolfgang Obermeier, Ludwig-Maximilians-Universität München, Department für Geographie  
Andreas Oschlies, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel  
Julia Pongratz, Ludwig-Maximilians-Universität, München, Department für Geographie  
Anna Possner, Goethe-Universität Frankfurt, Institut für Atmosphäre und Umwelt  
Johannes Quaas, Universität Leipzig, Institut für Meteorologie  
Anja Rammig, Technische Universität München, TUM School of Life Sciences Weihenstephan  
Markus Quante, Helmholtz-Zentrum Hereon, Geesthacht

---

*Wilfried Rickels, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Weltwirtschaft*  
*Ulf Riebesell, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel*  
*Dana Ruddigkeit, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau*  
*Jürgen Scheffran, Universität Hamburg, Institut für Geographie, CEN*  
*Julia Schmetzer, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)*  
*Eva Sinemus, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Walther-Schücking-Institut für Internationales Recht*  
*Victor Smetacek, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)*  
*Wolfgang R. Streit, Universität Hamburg, Department für Mikrobiologie und Biotechnologie*  
*Lukas Tank, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Philosophische Fakultät*  
*Lina Teckentrup, ARC Centre of Excellence for Climate Extremes, Sydney (Australien)*  
*Vicky M. Temperton, Leuphana Universität Lüneburg, Institut für Ökologie - Fakultät Nachhaltigkeit*  
*Claudia Timmreck, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg*  
*Rainer vom Lehn, Institut für Ökologie, TU Berlin REM, Real Estate Management*  
*Klaus Wallmann, GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel*  
*Andreas P. M. Weber, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Biochemie der Pflanzen*  
*Martin Wiesmeier, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft*  
*Dieter A. Wolf-Gladrow, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)*  
*Christina Wulf, Institut für Energie- und Klimaforschung - Forschungszentrum Jülich GmbH*  
*Heike Zimmermann-Timm, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Ökologie, Evolution und Diversität*

### **Gutachter**

*PD Dr. Rüdiger Berghahn, ex Umweltbundesamt*  
*Prof. (em) Dr. Siegmund-W. Breckle, Ökologie Bielefeld*  
*Prof. Dr. Thomas Foken, MikroMeteorologische Beratung, Bischberg*  
*Prof. (em) Dr. Hartmut Graßl, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg*  
*Prof. Dr. Peter-Diedrich Hansen, Institut für Ökologie, TU Berlin REM, Real Estate Management*  
*Prof. (em) Peter Hupfer, (ex) Humboldt Universität zu Berlin*  
*Dr. Dieter Kasang, Deutsches Klimarechenzentrum, Hamburg*  
*Prof. Dr. Thomas Leisner, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruhe (KIT)*  
*Dr. José L. Lozán, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg*  
*Dr. Volker Matthias, Helmholtz-Zentrum Hereon, Institut für Umweltchemie im Küstenraum, Geesthacht*  
*Dipl. Biol. Hanns-J. Neubert, ScienceCom, Hamburg*  
*Prof. Dr. Johannes Quaas, Universität Leipzig, Institut für Meteorologie*  
*Prof. Dr. Markus Quante, Helmholtz-Zentrum Hereon, Institut für Küstenforschung, Geesthacht*  
*Dr. Eike Rachor, Alfred-Wegener-Institute, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung - Bremerhaven*  
*Prof. Dr. Dieter A. Wolf-Gladrow, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung*