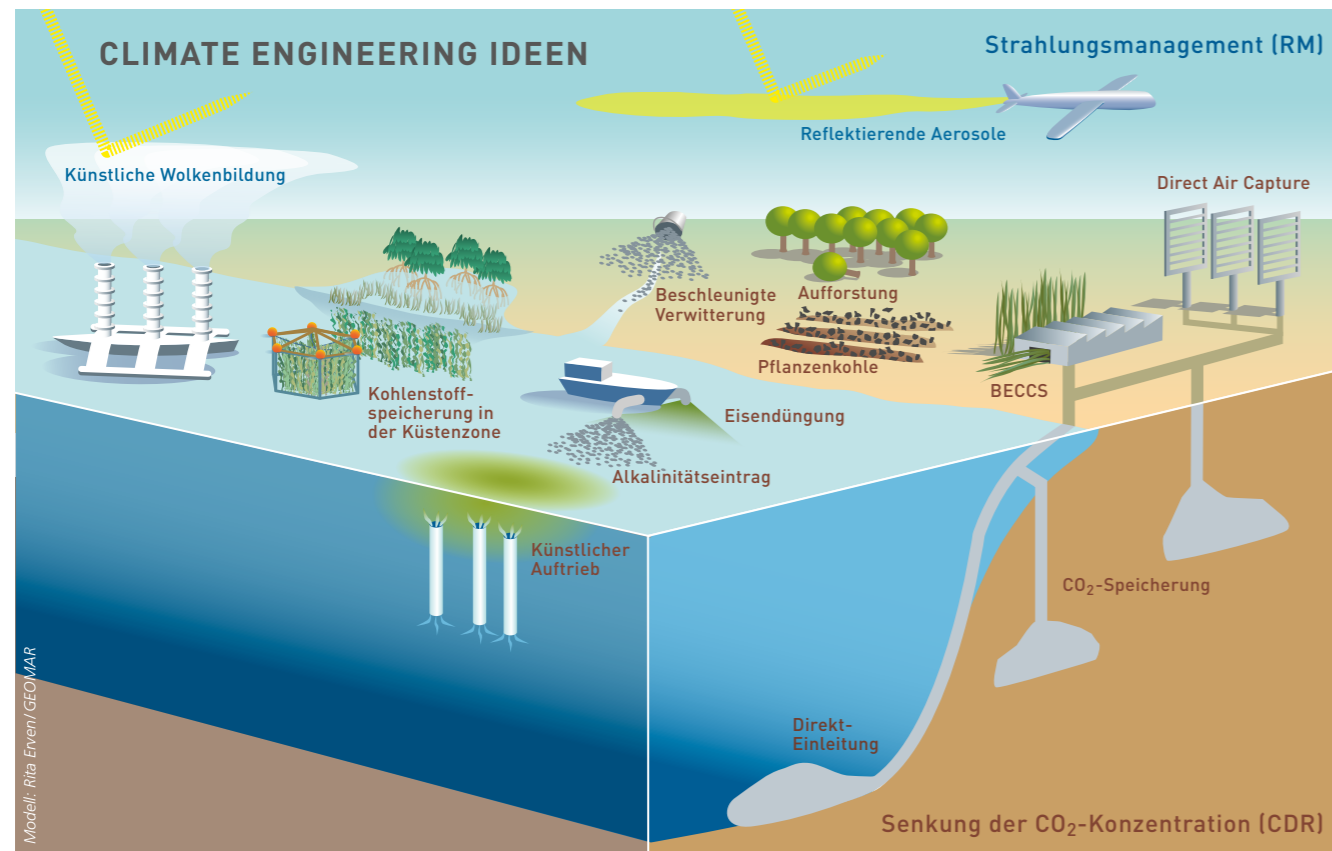


Andreas Oschlies und Ulrike Bernitt



## Das Klima retten – aber wie?

Climate Engineering: Weil selbst eine drastische Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen nicht reicht, werden gezielte Eingriffe in das Klimasystem diskutiert. Die Optionen reichen von der Entnahme und Speicherung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre bis zur Beeinflussung der Sonnenstrahlung. Ein interdisziplinäres Projekt hat auf Potenziale und Risiken geblickt.

Im Dezember 2015 wurde in Paris Geschichte geschrieben: 175 Staaten einigten sich in einer internationalen Klimakonferenz auf das Ziel, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius zu begrenzen. Dieses „Übereinkommen von Paris“ war ein beeindruckender diplomatischer Erfolg. Was seitdem passiert ist, ist weniger beeindruckend: 2019 haben die weltweiten Emissionen von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) sogar einen neuen Rekordwert erreicht,

und selbst jährliche Reduktionsraten im Umfang des 2020 durch die COVID-19-Pandemie verursachten Rückgangs der CO<sub>2</sub>-Emissionen würden für das Erreichen der Klimaziele nicht mehr ausreichen. Das bis zum Überschreiten der vereinbarten Klimaziele noch verfügbare Emissionsbudget schrumpft dramatisch – und damit die verbleibende Zeit, die existenzbedrohenden Folgen einer weiteren Erderwärmung abzuwenden.

Die Hoffnung auf das 1,5-Grad- oder zumindest 2-Grad-Ziel speist sich aus dem optimistischsten Szenario des 5. Sachstandsberichts des Weltklimarats von 2013 sowie aus dem 2018 veröffentlichten Sonderbericht zum 1,5-Grad-Ziel. In allen Szenarien reicht selbst eine drastische Emissionsreduktion allein nicht aus, um die Klimaziele noch zu erreichen. In diesen Berichten gehen Klimaforscher daher nicht nur davon aus, dass weitreichende Maßnahmen zur

Links: Visualisiert in einer Modelldarstellung – Methoden des Climate Engineerings, die wissenschaftlich und politisch kontrovers diskutiert werden.

Emissionsvermeidung weltweit rasch umgesetzt werden. Sie kalkulieren zusätzlich mit ein, dass die Menschheit zukünftig in der Lage sein wird, CO<sub>2</sub> im großen Maßstab von einigen Milliarden Tonnen pro Jahr aus der Erdatmosphäre zu entfernen und sicher zu speichern. Mit jedem Jahr, in dem die Vermeidung von Emissionen weiter aufgeschoben wird, steigen Menge und Geschwindigkeit, mit der CO<sub>2</sub> wieder aus der Atmosphäre entfernt werden muss. Wie aber lassen sich große Mengen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre entnehmen und damit „negative Emissionen“ erzeugen?

Es gibt verschiedene physikalische, chemische und biologische Möglichkeiten, CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre zu entfernen und an Land oder im

Ozean zu speichern. Einige Kohlenstoffspeicher sind dauerhaft, andere nur temporär. Zu letzteren zählen unter anderem Bäume. Während ihres Wachstums entziehen Bäume der Atmosphäre CO<sub>2</sub> und speichern dieses als Kohlenstoff im Holz – je nach Lebensalter des Baumes für Jahrhunderte. Auch als Baumaterial verwendet kann der Kohlenstoff für lange Zeit konserviert werden. Beim Verbrennen oder Verfaulen des Holzes wird aber das gesamte CO<sub>2</sub> wieder frei. Durch die Umwandlung in Pflanzenkohle könnte das von Pflanzen aufgenommene Treibhausgas möglicherweise sogar einige Tausend Jahre gespeichert werden.

Als dauerhafte Speicher kommen vor allem geologische Speicher und der Ozean infrage. Zu den geologischen Speicherformen gehört die Lagerung von CO<sub>2</sub> in Gesteinsformationen, wobei in Abhängigkeit von

Gesteinsart und lokalen Bedingungen sogar eine Umwandlung des in flüssiger Form eingebrachten CO<sub>2</sub> in feste Karbonatminerale stattfinden kann. Eine geologische Lagerung ist für Methoden des sogenannten Direct Air Capture, bei dem künstliche Bäume das CO<sub>2</sub> einfangen, oder bei Bioenergie mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS) im Gespräch. Für eine dauerhafte Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre wird auch das Einbringen basischer Substanzen, insbesondere Gesteinsmehl, in den Ozean angedacht. Ziel ist dabei, das im Meerwasser gelöste CO<sub>2</sub> durch Verwitterung des Gesteins chemisch dauerhaft zu neutralisieren und dadurch die CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität des Ozeans zu erhöhen.

Weil eine umfangreiche Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre einen gezielten Eingriff in das Klimasystem darstellt, werden diese Verfahren häu-

Nüchterne Analyse: Selbst wenn alle Möglichkeiten der CO<sub>2</sub>-Reduzierung genutzt würden, ist das klimapolitische 2-Grad-Ziel realistischlicherweise nicht mehr zu erreichen. Es bliebe ein Rest an Erwärmung, hier grob skizziert als orangefarbene Fläche.

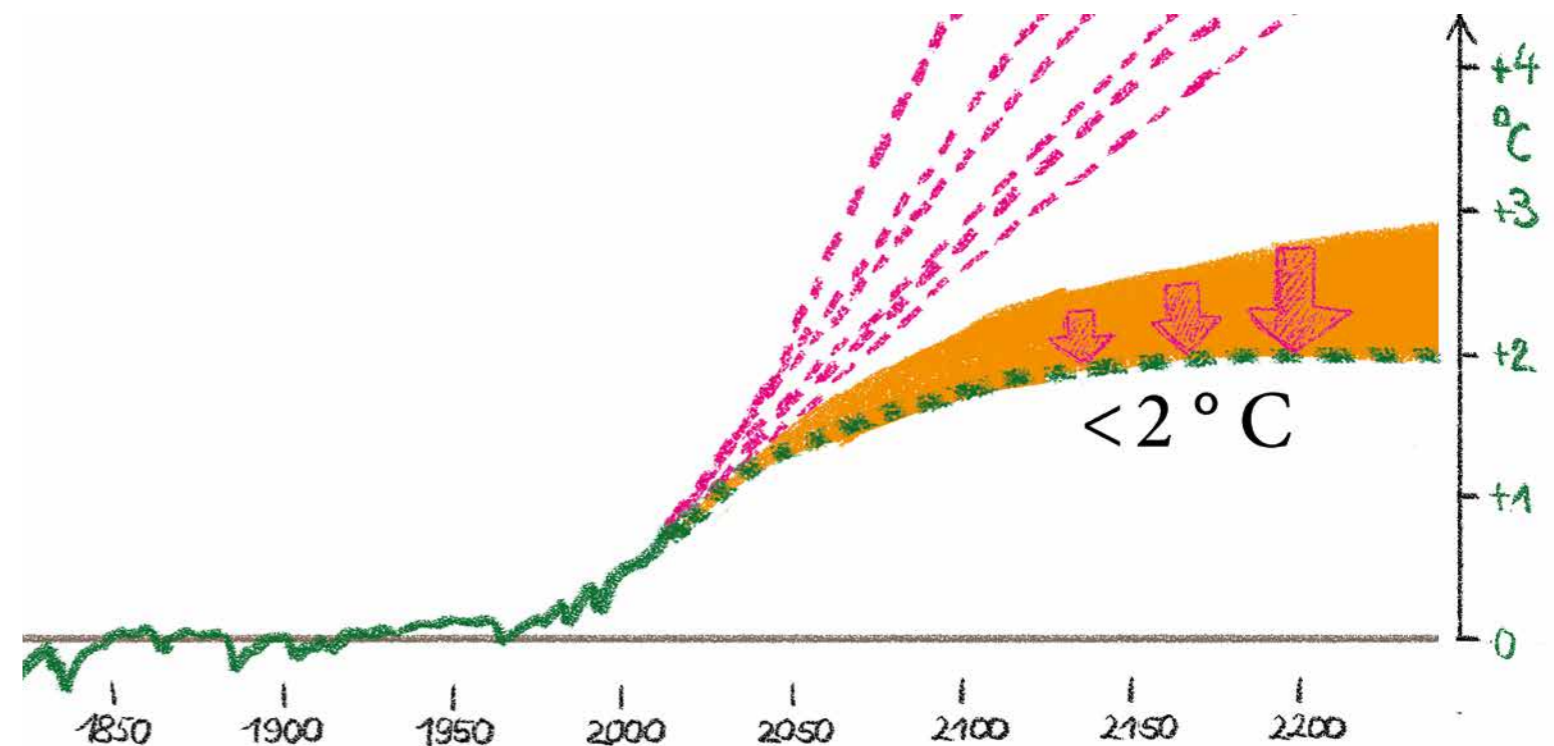


fig dem Begriff „Climate Engineering“ zugeordnet. Derselbe Begriff umfasst aber auch Ideen, direkt in den Strahlungshaushalt der Erde einzugreifen („Strahlungsmanagement“) und einen Teil der auf die Erde auftreffenden Sonnenstrahlung durch Aerosole vor der Erdatmosphäre abzuschirmen oder durch eine Aufhellung von Wolken, Land- oder Meeresoberfläche ins Weltall zurückzuspiegeln. Die eigentliche Ursache der Erwärmung – die hohe  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre – würde dabei anders als bei der  $\text{CO}_2$ -Entnahme jedoch nicht beseitigt werden.

In den vergangenen sieben Jahren wurden in einem DFG-Schwerpunktprogramm die Risiken, Herausforderungen und Möglichkeiten von Climate Engineering interdisziplinär untersucht. Eine Prämisse des Schwerpunktprogramms war, dass Forschung ausschließlich zur Bewertung und nicht zu Entwicklung oder gar Anwendung von Climate Engineering durchgeführt werden sollte.

Ein Ergebnis des interdisziplinären Forschungsprogramms: Je genauer man hinschaut, desto kleiner

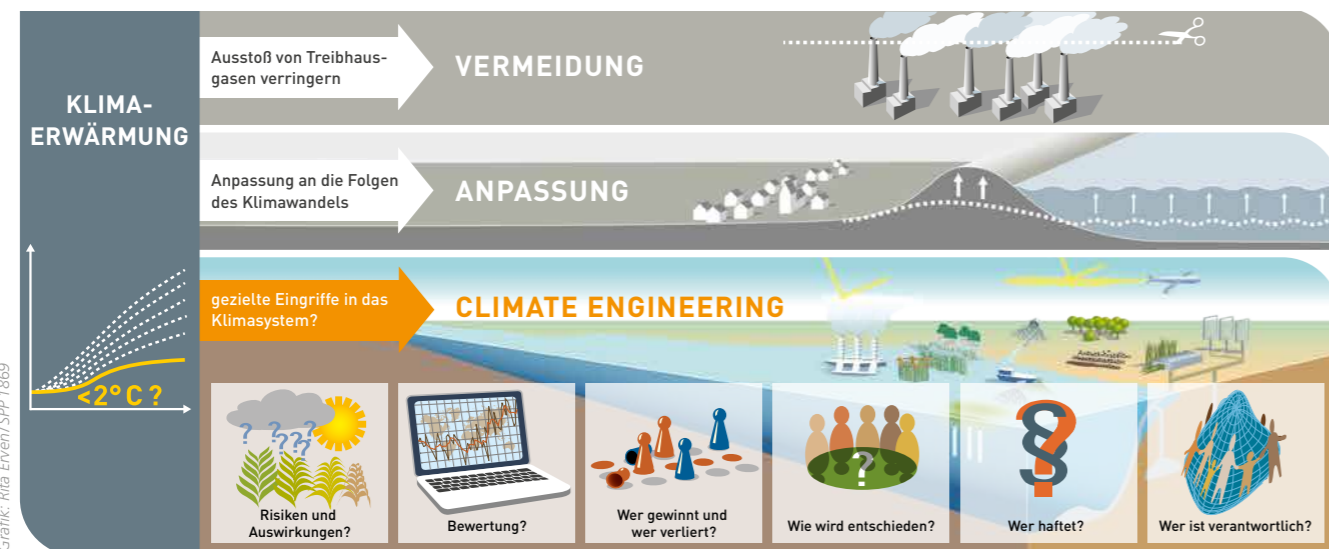
erscheint das Potenzial der einzelnen Methoden – und desto größer die Summe der Nebenwirkungen. Dies gilt für technologisch utopisch anmutende Verfahren, wie etwa das Strahlungsmanagement, ebenso wie für vermeintlich „grüne“ Methoden, wie Aufforstung und BECCS. Landbasierte Verfahren, die auf Biomasseproduktion beruhen, beeinflussen die Farbe des Planeten, den Wasserkreislauf und die Biodiversität. Über den Bedarf an Wasser, Nährstoffen und Fläche können sie zu Konflikten mit der Landwirtschaft und Nahrungsmittelproduktion führen. Viele Fragen sind hier noch unbeantwortet: Lassen sich Anwendungen in großem Maßstab mit Naturschutz und anderen Nachhaltigkeitszielen vereinbaren? Und wie stabil ist die langzeitliche  $\text{CO}_2$ -Speicherung bei diesen Verfahren?

Nach heutigem Wissen müssen bereits im Jahr 2030 Milliarden Tonnen  $\text{CO}_2$  pro Jahr sicher aus der Atmosphäre entnommen werden, um die Klimaziele noch erreichen zu können. Damit gibt es erheblichen

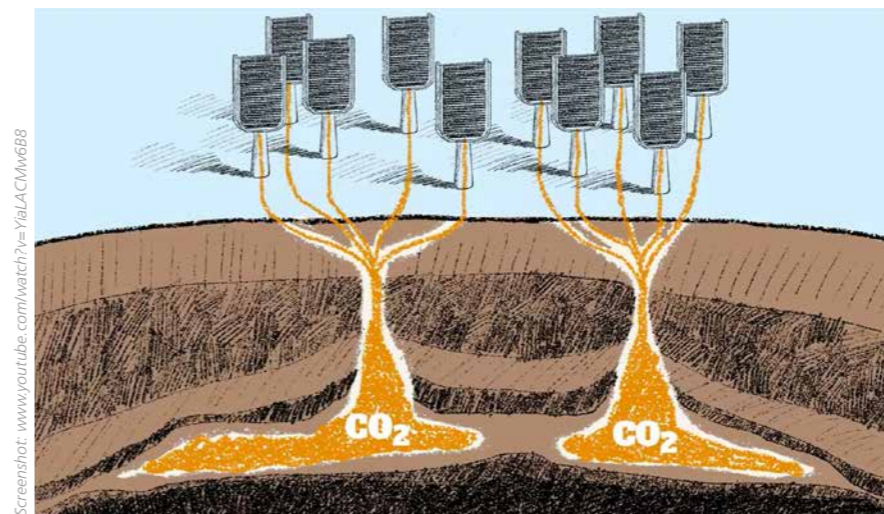
Handlungsdruck, alle möglichen Optionen der  $\text{CO}_2$ -Entnahme zu erforschen. Neben Potenzialen, Risiken und Nebenwirkungen müssen auch die praktische Anwendbarkeit, Skalierbarkeit und Kontrollierbarkeit im Rahmen von anwendungsbezogener Forschung untersucht, Infrastrukturen entwickelt und politische Steuerungs- und Regulationsmechanismen mit Hochdruck vorangetrieben werden.

Da wissenschaftlich belastbare, gesellschaftlich akzeptierte und politisch umsetzbare Fahrpläne zum Erreichen der Klimaziele fehlen, gibt es auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, vor allem in den USA, die offensiv über verstärkte Forschung zum Strahlungsmanagement nachdenken. Dabei wird hauptsächlich von dem Szenario ausgegangen, dass ein vorübergehendes Überschreiten des verbleibenden Emissionsbudgets so lange durch eine Reduktion des einfallenden Sonnenlichts kompensiert werden könnte, bis durch  $\text{CO}_2$ -Entnahme ausreichend  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre entfernt worden ist. „Vorübergehend“ hieße hier aller-

Die globale Klimaerwärmung ist gewiss – die Möglichkeiten des Climate Engineerings sind noch ungewiss. Viele Fragen sind offen, weil Chancen und Risiken der unterschiedlichen Ansätze und Methoden nicht abschließend bewertet sind.



Grafik: Rita Erven/SPP 1689



Aus einem Trickfilm des SPP 1689: Das „Direct-Air-Capture-System“ ist möglicherweise eine Option, der Atmosphäre  $\text{CO}_2$  zu entziehen und in der Tiefe zu speichern. Das Problem: der absehbar hohe Energiebedarf. Gibt es dafür eine Lösung?

dings viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte, in denen ein zuverlässiger Betrieb, eine begleitende  $\text{CO}_2$ -Entnahme und tragfähige internationale Regeln zum Umgang mit Nebenwirkungen gewährleistet werden müssten. Bei einem vorzeitigen Stopp des Strahlungsmanagements würden ansonsten die weiterhin hohen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in der Atmosphäre zu einer raschen Erwärmung führen. Nebenwirkungen entstünden bei einem solchen Strahlungsmanagement insbesondere durch die unterschiedliche Wirkungsweise von  $\text{CO}_2$  (wirkt auf die global relativ gleichmäßig verteilte Wärmestrahlung) und der angedachten Aerosol-Ausbringung (stärkste Wirkung, wenn die Sonne scheint, also tagsüber in den Tropen, und keine Wirkung im polaren Winter).

Regional können Klima und damit auch Wetter und Extremwetterereignisse unter Strahlungsmanagement erheblich von einer Welt ohne Strahlungsmanagement und dafür geringerer  $\text{CO}_2$ -Konzentration abweichen. Das würde einen weiten Spielraum für Streitigkeiten zwi-

schen den „gefühlten“ Gewinnern und Verlierern eröffnen.

Anders als beim Strahlungsmanagement könnte die Entnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre jederzeit gestoppt werden. Solange das entnommene  $\text{CO}_2$  sicher gespeichert ist, gibt es kein Rückschlagpotenzial im Klimasystem. Entscheidend für eine effektive  $\text{CO}_2$ -Entnahme wird damit, langfristige, sichere Speicher zu finden, wie bei der beschleunigten Verwitterung von Gestein oder bei Carbon Capture and Storage (CCS, Speicherung in geologischen Strukturen). Das heißt auch, dass wir uns mit CCS – bisher ein Tabuthema in Deutschland – auseinandersetzen müssen.

Sicher ist:  $\text{CO}_2$ -Entnahme ist kein geeignetes Mittel, um schnell die Klimaabläufe der Erde zu beeinflussen. Es braucht viele Jahre bis Jahrzehnte, um die erforderlichen Mengen zu entnehmen und eine klimatische Wirkung zu entfalten. Maßnahmen zur  $\text{CO}_2$ -Entnahme müssten also rechtzeitig und über eine längere Zeit angewendet wer-

den. Bei vielen Verfahren muss darüber hinaus die Dauerhaftigkeit der  $\text{CO}_2$ -Speicherung überwacht werden. Die Entnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre – mit welcher Methode auch immer – ist derzeit technisch noch nicht ausgereift; Entwicklung und Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur können ebenso wie die dafür notwendigen gesellschaftlichen Entscheidungen Jahrzehnte dauern. Aus klimawissenschaftlicher Sicht ist längst klar, dass die Klimaziele ohne  $\text{CO}_2$ -Entnahme nicht mehr erreicht werden können. Eine differenzierte und zielgerichtete Debatte unter Einbeziehung von Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft ist dringend erforderlich, um die einzelnen Ansätze zu beurteilen und tragfähige und zielführende Entscheidungen darüber zu treffen, wie wir die versprochenen Klimaziele tatsächlich erreichen wollen.



**Professor Dr. Andreas Oschlies**

leitet die Forschungseinheit Biogeochemische Modellierung am GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel und ist Koordinator des Schwerpunktprogramms 1689.

**Ulrike Bernitt**

ist verantwortlich für Management und Wissenstransfer im Programm.

Adresse: GEOMAR – Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, Düsternbrooker Weg 20, 24105 Kiel

Förderung im Rahmen des SPP 1689 „Climate Engineering: Risiken, Herausforderungen, Möglichkeiten?“

Weiterführende Informationen: Die Broschüre „Climate Engineering und unsere Klimaziele – eine überfällige Debatte“ ist erhältlich über die Homepage des SPP 1689: [www.spp-climate-engineering.de](http://www.spp-climate-engineering.de)

