

schlimmsten Climate-Engineering-Alpträume vorstellte, die er die Woche über von den Konferenzteilnehmern gesammelt hatte. Diese reichten von einem Fehlschlag eines großen Feldexperiments mit unkontrollierbaren Nebenwirkungen bis hin zu einem „zu guten“ Funktionieren einer Climate-Engineering-Methode, was einzelne Akteure dazu verleiten könnte, kurzfristig und lokal optimale Klimabedingungen schaffen zu wollen (nicht zu kalte Winter, nicht zu warme Sommer, hier ein etwas stärkerer Monsun, dort ein etwas schwächerer...).

Das hochgesteckte Ziel der Organisatoren, einen Vorschlag für ein Regelwerk oder zumindest einen Verhaltenskodex zu entwickeln, wurde nicht erreicht. Ein Abschlusskommuniqué mit dem Hinweis auf die Notwendigkeit solcher Regeln und die Forderung nach weiteren Anstrengungen wurde in der letzten Nacht vom wissenschaftlichen Organisationskomitee verfasst und den übrigen Konferenzteilnehmern zur Unterzeichnung angeboten. Weitere Diskussionen auf nationaler und internationaler Ebene werden erforderlich sein, um zu einer befriedigenden Kontrolle von Climate-Engineering-Forschung zu gelangen. Das Asilomar-Treffen war dafür nur ein erster Schritt. Weitere Informationen zum Ablauf der Konferenz sind unter <http://www.climateresponsefund.org/> einsehbar.

### Anmerkung

- 1) „Breakout“-Gruppen sind zeitgleich stattfindende Arbeitsgruppen, die anschließend ihre Ergebnisse ins Plenum der Konferenz einbringen.

### Kontakt

Prof. Andreas Oschlies  
Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der  
Universität Kiel (IFM-GEOMAR)  
Düsternbrooker Weg 20, 24105 Kiel  
Tel.: +49 (0) 4 31 / 6 00 19 36  
E-Mail: [aoschlies@ifm-geomar.de](mailto:aoschlies@ifm-geomar.de)  
Internet: <http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=3314&L=1>

« »

## Climate Engineering Light

### Natürliche Prozesse der CO<sub>2</sub>-Speicherung

von Christine Rösch, Matthias Achternbosch, Jens Schippl und Gerhard Sarde-  
mann, ITAS

**Nach dem gescheiterten Klimagipfel in Kopenhagen werden Climate-Engineering-Maßnahmen zunehmend als ultima ratio zum Schutz des Klimas diskutiert. Dabei stehen großskalige Strategien wie die Verteilung von Aerosolen in der Stratosphäre im Vordergrund. In diesem Beitrag liegt der Schwerpunkt auf weniger risikoreichen, regionalen Ansätzen, die auf eine langfristige Bindung von Kohlenstoff abzielen, z. T. aber auch in den Strahlungshaushalt eingreifen können. Abschätzungen über den Umfang und Zeithorizont des CO<sub>2</sub>-Speichervermögens der dargestellten bio- und geotechnologischen Verfahren sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese lassen sich jedoch durch Fortschritte in Forschung und Entwicklung verringern. Die ausgewählten Ansätze wirken sich nicht nur positiv auf das Klima aus, sondern tragen teilweise auch zur Erreichung anderer gesellschaftspolitisch relevanter Ziele (z. B. dem Erhalt der Biodiversität) bei. Diese Multifunktionalität sollte bei Klimaschutzmaßnahmen stärker berücksichtigt und angestrebt werden.**

### 1 Einleitung

Die ungebrochene Erhöhung der globalen CO<sub>2</sub>-Konzentration durch die anthropogen verursachte Freisetzung von derzeit 32 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> – davon ca. 900 Mio. Tonnen in Deutschland – erhöht den politischen Handlungsdruck. Nach dem gescheiterten Klimagipfel in Kopenhagen werden immer häufiger Climate-Engineering-Maßnahmen als ultima ratio zum Schutz des Klimas diskutiert. Der Begriff „Climate Engineering“ (CE) steht für futuristische Mega-Konzepte wie die Installation gigantischer Sonnensegel zur Beschattung der Erde oder an die Eisendüngung großer Ozeanflächen zur Intensivierung der CO<sub>2</sub>-Aufnahme. Es handelt sich hierbei um Maßnah-

men mit dem „großen Hebel“ (Leisner, Müller-Klieser in diesem Heft).

In der Öffentlichkeit, vor allem in Europa, stößt CE auf große Skepsis und fehlende gesellschaftliche Akzeptanz. Vielfach werden die Vorschläge als Versuch gewertet, von einschneidenden Klimaschutzprogrammen und Verhaltensänderungen abzulenken. Das Hauptargument gegen CE sind jedoch die Unsicherheiten über global und regional sehr unterschiedlich ausfallende Effekte sowie nicht vorhersehbare und nicht intendierte Folgen.

In diesem Kontext besteht Interesse an CE-Konzepten, die sich an natürlichen Prozessen der CO<sub>2</sub>-Bindung orientieren und diese verstärken oder in technischen Anlagen kopieren wollen. Es wird davon ausgegangen, dass sie mit weniger unbekanntem und unerwünschten Nebenfolgen verbunden sind und sich einfacher steuern und umsetzen lassen (siehe dazu Ott in diesem Heft). Aus diesem Grund bezeichnen die Autoren diese Maßnahmen als „Light-Version“ zur Lösung des CO<sub>2</sub>-Problems. Im folgenden Beitrag werden einige dieser Strategien dargestellt und offene Forschungsfragen identifiziert.<sup>1</sup> Behandelt werden in diesem Kontext folgende Konzepte:

- „climate farming“ durch Erhalt und Ausdehnung der Wald- und Moorflächen sowie regionale Änderungen der Flächennutzung,
- biologische Sequestrierung (Umwandlung von Biomasse in Biokohle) und
- mineralische Sequestrierung.

Die Auswahl strebt keine Vollständigkeit an, sondern soll sowohl bekannte Verfahren als auch bio- und geotechnologische Lösungsansätze aufzeigen, die sich noch im Stadium der Forschung und Entwicklung befinden.

## 2 Climate Farming

Climate Farming hat zum Ziel, durch land- und forstwirtschaftliche Maßnahmen biologische Kohlenstoffspeicher aufzubauen. Pflanzen nehmen über die Photosynthese CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre auf und nutzen den Kohlenstoff zum Aufbau organischer Verbindungen. Der Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Atmosphäre kann die Biomasse-

produktion erhöhen, da die heutige CO<sub>2</sub>-Konzentration für die meisten Kulturpflanzen suboptimal ist. Regional können allerdings begrenzte Wasser- und Nährstoffverfügbarkeiten eine Nutzung des höheren CO<sub>2</sub>-Angebots zur Ertragssteigerung verhindern. Landwirtschaftliche Kulturpflanzen verfügen meist über keine nennenswerte Speicherwirkung, da sie in der Regel jährlich geerntet werden und die Biomasse als Nahrungs- oder Futtermittel genutzt wird. Dabei wird das gebundene CO<sub>2</sub> zeitnah zur Fixierung wieder freigesetzt. Über die Substitution fossiler Energieträger und Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe besteht die Möglichkeit, den Ausstoß an CO<sub>2</sub> zu verringern. Auf diese CO<sub>2</sub>-Vermeidungsstrategie soll hier aber nicht weiter eingegangen werden. Nachfolgend wird der Fokus auf Wälder und Moore gelegt, weil diese terrestrischen Ökosysteme über nachhaltigere und flächenspezifisch deutlich größere Speicherkapazitäten verfügen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass landwirtschaftliche Böden mit hohem Humusgehalt in größerem Umfang Kohlenstoff enthalten und Maßnahmen wie der Umbruch von Grünland klimarelevant sind. Strategien zum Erhalt und zur Steigerung des Humusgehalts in landwirtschaftlichen Böden dienen deshalb auch dem Klimaschutz. Gleichzeitig tragen sie zur Erreichung anderer Nachhaltigkeitsziele wie dem Bodenschutz bei.

### 2.1 Erhalt und Ausdehnung der Wald- und Moorflächen

Die Wälder der Erde bedecken über vier Mrd. Hektar (entspricht 31 Prozent der Landfläche) und stellen große Kohlenstoffvorräte dar. Dieser enorme Waldspeicher wird jedoch stetig verkleinert. Weltweit gingen in den letzten zehn Jahren rd. 13 Mio. Hektar, vor allem in Brasilien und Indonesien, durch Umwandlung in Agrarflächen verloren (FAO 2010). Der Erhalt und die nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern, insbesondere von tropischen Regenwäldern gehören zu den weitreichendsten, schnellsten und billigsten Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen. Nach Schätzung der FAO (2010) speichern die Wälder weltweit 289 Mrd. Tonnen Kohlenstoff allein in ihrer Biomasse. Dieser

Kohlenstoffspeicher wurde von 2005 bis 2010 meist durch Brandrodungen um 500 bis 650 Mio. Tonnen verringert (FAO 2010; Lippelt 2010).

Durch Aufforstung degenerierter Standorte und marginaler landwirtschaftlicher Flächen kann der Kohlenstoffspeicher Wald jedoch ausgebaut werden. Aufforstungsmaßnahmen in verschiedenen Ländern konnten den globalen Netto-Waldverlust auf 5,2 Mio. Hektar pro Jahr im Zeitraum 2000 bis 2010 verringern (FAO 2010). Dies geschah vor allem in China, wo die Waldfläche in den letzten Jahren allein um vier Mio. Hektar jährlich ausgedehnt wurde, sowie in Europa und in Nordamerika. Die Ausdehnung der Waldfläche in den genannten Ländern ist jedoch weniger auf Klimaschutzanreize als vielmehr auf den steigenden Bedarf an Holz als Rohstoff und Energieträger sowie in Europa auch auf fehlende Nutzungsalternativen für Ackerflächen und Grünlandstandorte zurückzuführen. Nach Angaben der Naturschutzorganisation „Global Partnership on Forest Restoration“ könnten weltweit der Atmosphäre bis 2030 durch Aufforstung insgesamt 70 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> entzogen werden.

Aber nicht allein die reine Waldflächenbilanz ist bei der Diskussion um Kohlenstoff in Wäldern entscheidend, sondern auch der Anteil natürlicher Urwälder. Im Vergleich zu Wirtschaftswäldern speichern diese entscheidend mehr Kohlenstoff und nehmen trotz ihres Alters noch immer Kohlenstoff auf. Schnellwachsende Holzplantagen stellen aufgrund kurzer Umtriebszeiten nur temporäre Kohlenstoffspeicher dar. Demzufolge kann eine Plantagenaufforstung nach der Rodung von Urwald nicht als ausgeglichen in Bezug auf die Kohlenstoffbilanz angesehen werden. Der Erfolg von Maßnahmen zur nachhaltigen Erhöhung des biologisch gebundenen Kohlenstoffs hängt von der globalen Langfrist-Bilanz zwischen Waldverlusten und Aufforstungen ab. Durch Änderungen in der Bewirtschaftung von Wäldern, vor allem hinsichtlich der Ernteintervalle und der nachgelagerten Holzbearbeitung und -nutzung, kann die Festlegung von Kohlenstoff erhöht werden (Nunery, Keeton 2010).

Auch bei globalem Nettozuwachs an Waldfläche durch Aufforstung bislang nicht bewaldeter Landflächen wird – über lange Zeiträume gesehen – dieser zusätzliche Kohlenstoffspeicher

wieder aufgelöst, wenn Bäume gefällt und genutzt werden oder diese absterben und mikrobiell zersetzt werden. Dies gilt auch für Maßnahmen zur Steigerung des Baumwachstums, durch die das Treibhausgasproblem in die Zukunft verlagert wird, was auch als „buying time“ bezeichnet wird (Körner 2009).

Eine hohe Biodiversität einer Waldfläche kann die Bedeutung des Waldes als Kohlenstoffspeicher direkt und indirekt beeinflussen. Direkt durch ihren Einfluss auf die Höhe, Umsetzungsrate und Dauerhaftigkeit des Kohlenstoffvorrates und indirekt durch ihren Einfluss auf den Schutzstatus, den die Gesellschaft dieser Fläche zuordnet (Diaz et al. 2009). Das Nachhaltigkeitsziel Biodiversität sollte deshalb bei Maßnahmen zur Nutzung von Wald als Kohlenstoffspeicher stärker berücksichtigt werden.

Neben den Wäldern wirken auch Moore als terrestrische CO<sub>2</sub>-Speicher, da sie einen besonders hohen Anteil an organisch gebundenem Kohlenstoff aufweisen. In wachsenden Mooren werden aufgrund der dauerhaften Wassersättigung des Substrats die Reste der abgestorbenen Pflanzen langsamer abgebaut als neues Pflanzenmaterial produziert wird. Diese häufen sich langfristig zu dicken Schichten Torf auf. Weltweit binden die noch torfbildenden Moore jährlich 150–250 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> in neu gebildete Torfe. Es wird geschätzt, dass in den Mooren, die weltweit nur ca. drei Prozent der Landfläche bedecken, etwa doppelt so viel Kohlenstoff gespeichert ist wie in Wäldern, deren Flächenanteil 31 Prozent beträgt (FAO 2010). Auch in Deutschland sind wachende, torfakkumulierende Moore selten geworden. Etwa 99 % aller Moore Deutschlands (ca. 1,5 Mio. ha oder 4,2 % der Landesfläche) sind „tot“, d. h. entwässert und abgebaut, oder werden land- und forstwirtschaftlich genutzt. Durch den Schutz bestehender Moore vor Entwässerung und Nutzung als Siedlungsland, Brennstoff oder Bodenverbesserungsmittel kann ihr Kohlenstoffvorrat erhalten werden. Die Wiedervernässung von degradierten Mooren stellt insgesamt eine kostengünstige Maßnahme zur dauerhaften CO<sub>2</sub>-Bindung dar.

In Bezug auf die Bilanzierung der Kohlenstoffspeicherung durch terrestrische Ökosysteme bestehen große Unsicherheiten. Hier bedarf es wissenschaftlicher Forschung. Auch die Proble-

matik zunehmender Flächennutzungskonkurrenzen durch Maßnahmen zum Erhalt und Ausdehnung von Landnutzungen zur Speicherung von Kohlenstoff ist wenig untersucht. Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der Maßnahmen zur Wald- und Moorbewirtschaftung, die auf CO<sub>2</sub>-Speicherung optimiert und an die Vulnerabilität der Wald- und Moorökosysteme gegenüber den Folgen des Klimawandels angepasst sind. Weiterhin sind Umsetzungsstrategien und Förderinstrumente zur Realisierung der Speicherpotenziale von Wäldern und Mooren zu entwickeln.

## 2.2 Regionale Änderung der Flächennutzung

Der Temperaturanstieg infolge des Klimawandels kann durch eine Modifikation der Flächennutzung auf regionaler Ebene auch durch Eingriffe in den Strahlungshaushalt begrenzt werden. Es handelt sich hier also um ein regionales SRM (Solar Radiation Management). Durch den weiträumigen Anbau geeigneter Kulturpflanzen könnte die Oberflächenalbedo so gesteigert werden, dass nach Modellrechnungen im Sommer eine Abkühlung um ca. 1° C in den mittleren nördlichen Breiten möglich wird (Ridgwell et al. 2009). Die Nutzung dieses „Leaf Albedo Bio-Geoengineering“ könnte durch gentechnische Veränderung der Kulturpflanzen noch verstärkt werden. Da der Albedoeffekt regional und zeitlich begrenzt ist, sollte diese Strategie durch andere regional wirksame Maßnahmen des Climate Engineering ergänzt werden, die nicht in Konkurrenz zu Landnutzungsänderungen zur Speicherung von Kohlenstoff stehen.

Grundsätzlich bietet sich in diesem Zusammenhang an, die Albedo von Siedlungsgebieten beispielsweise durch das „Weißen“ baulicher Infrastruktur zu erhöhen (Hamwey 2007). Auch spezifische Bebauungsstrukturen können zu solchen Effekten führen. So hat man festgestellt, dass die großflächige Errichtung von Gewächshäusern durch Reflektion der Sonneneinstrahlung die Erwärmung der Erdoberfläche verlangsamt und zu einem lokalen Abkühlungseffekt führt. Dieser auch als „Greenhouses Geo-Engineering“ bezeichnete Effekt ist in der südspanischen Pro-

vinz Almeria beobachtet worden.<sup>2</sup> Dort stehen in einem semiariden Gebiet auf 26.000 Hektar Gewächshäuser (Campra et al. 2008).

Regionale Veränderungen des Klimas durch Landnutzungsänderungen sind schon seit langem bekannt (Fleming 1998, S. 21 ff.) und bei der Analyse langjähriger Klimareihen zu berücksichtigen (städtische Wärmeinseln vs. landwirtschaftlich genutzte Regionen). Sie wurden aber zu großen Teilen als unbeabsichtigt, nicht steuerbar und unvermeidlich hingenommen. Inzwischen besteht jedoch der Wunsch, das Klima lokal so zu beeinflussen, dass durch Treibhausgasemissionen verursachte Klimaänderungen zumindest teilweise kompensiert werden. Pielke et al. (2002) schätzt die Klimaänderungen, die durch Landnutzung verursacht wurden, als ähnlich hoch wie die durch Treibhausgasemissionen bedingten Effekte.

So haben z. B. Bewässerungsmaßnahmen einen kühlenden Effekt („Cool Farming“). Nach Kueppers et al. (2007) beeinflusst die Bewässerung das regionale Klima auf verschiedenen Wegen. Zum einen wird die Bodenfarbe dunkler und die Pflanzenproduktivität erhöht, wodurch die Albedo des Bodens verringert, während die Albedo des Pflanzenbestandes erhöht wird. Zum anderen wird mehr Wasser über Transpiration und Evaporation verdunstet und über den Einfluss auf die lokale Bewölkung, Niederschläge und Temperatur werden die regionalen Zirkulationssysteme verändert.<sup>3</sup> Dieses sogenannte „Irrigation Climate Engineering“ ist im Wesentlichen das Ziel des Global-Cooling-Projekts.<sup>4</sup>

Zu den Vorteilen des regionalen Climate Engineering gehören positive regionale Nebeneffekte, wie z. B. die Verringerung der Vulnerabilität der Landnutzung (v. a. der Landwirtschaft) gegenüber Trockenheit. Der Einsatz erprobter und kostengünstiger sowie einfach umzusetzender Verfahren und Techniken sowie der rasche Effekt auf die Klimaerwärmung und ihre Folgen rechtfertigen den Einsatz regionaler Maßnahmen, ohne dass es internationaler Vereinbarungen bedarf. Allerdings befindet man sich hier in einem Grenzbereich zwischen Klimaschutzmaßnahme und Anpassung (Adaptation).

### 3 Umwandlung von Biomasse in Biokohle

Eine dauerhafte Speicherung des biogen gebundenen Kohlenstoffs erfordert eine Umwandlung von Biomasse in einen kohleähnlichen Zustand („Biokohle“). Technisch möglich ist dies durch Erhitzen von organischem Material in einer sauerstofffreien oder sauerstoffarmen Umgebung bei niedrigen Temperaturen und unter Druck (Lehmann et al. 2006). Bei diesem Prozess der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) wird die Biomasse teilweise unter Verwendung von Katalysatoren zersetzt („pyrolysiert“) und es entstehen poröse Braunkohle-Kügelchen mit einem hohem Kohlenstoffanteil (90 bis 99 Prozent) sowie gasförmige und flüssige Produkte (Röthlein 2006). Der Biomasseverkohlung wird wegen der stabilen Lagerung und der hohen Flexibilität bezüglich der Ausgangsbiomasse ein grundsätzlich großes Potenzial zur Reduktion des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts zugeschrieben (Royal Society 2009). Mit dem als „wässrige Verkohlung“ bezeichneten HTC-Verfahren lassen sich auch feuchte Ausgangsstoffe in Kohle umwandeln, ohne sie vorher trocknen zu müssen. In Forschungsprojekten wird deshalb die Eignung verschiedener feuchter Biomassen (z. B. Klärschlämme, Mikroalgen) untersucht (Charisius 2010; anonym 2010).

Der Einsatz von Mikroalgen als Substrat hätte verschiedene Vorteile: Zum einen könnten bei der Kultivierung von Mikroalgen CO<sub>2</sub>-haltige Abgase aus Kraftwerken oder Industrieprozessen (wie denen in Kraft-, Zement-, Kalk- oder Papierwerken) direkt genutzt und so das Algenwachstum beschleunigt werden. Zum zweiten konkurriert die Biomasseerzeugung mit Mikroalgen nicht um fruchtbare Flächen, da sie keine Ansprüche an die Bodenqualität stellt und auch auf versiegelten Flächen oder in Salz- und Abwasser kultiviert werden kann. Des Weiteren können Mikroalgen im Vergleich zu traditionellen Biomasseproduzenten höhere flächenspezifische Erträge produzieren; dies betrifft vor allem die Öl- und Eiweißgehalte (Tredici 2010). Die Kultivierung in Photobioreaktoren bedarf jedoch aufgrund des hohen Energiebedarfs für das Durchmischen und Kühlen der Algensuspension sowie für die Algenernte noch deutlicher Fort-

schritte (Rösch et al. 2009). Ebenso müssen die Anlagen- und Betriebskosten deutlich gesenkt werden, wenn eine Kommerzialisierung der Mikroalgenproduktion gelingen soll. Zudem sollte erforscht werden, ob sekundäre Nährstoffquellen (wie z. B. kommunale Abwässer) zur Deckung des Stickstoff- und Phosphatbedarfs der Algen genutzt werden können.

Versuche zeigen, dass Mikroalgen unter moderaten Reaktionsbedingungen in einer energieeffizienten Wiese in ein kohleähnliches Algenprodukt überführt werden können, das die Qualität einer bituminösen Kohle besitzt (Heilmann et al. 2010). Der geringe Trockenmassegehalt einer Algensuspension (10 % Trockensubstanz) ist – im Gegensatz zu anderen Verfahren der Energiegewinnung aus Algen, die höhere TS-Gehalte erfordern und zu deren Erreichung ein hoher Energieaufwand benötigt wird – ideal für den HTC-Prozess.

Erste Lebenszyklusanalysen der Biokohleherstellung zeigen, dass einige der Methoden das Potenzial zur Kohlenstoffspeicherung haben und zudem Energie und einen hervorragenden Dünger liefern können (Gaunt, Lehmann 2008). Allerdings ist umstritten, ob die Biokohleherstellung vorteilhafter ist als die Substitution von CO<sub>2</sub>-intensiven fossilen Energieträgern durch Bioenergie (Royal Society 2009, S. 12). Auch muss die großtechnische Anwendbarkeit der Verfahren nachgewiesen werden und gezeigt werden, welche Stabilität die Biokohle in verschiedenen Klimazonen und Bodenarten langfristig hat (Reijnders 2009). Des Weiteren sollte erforscht werden, unter welchen Rahmenbedingungen Biokohle die Aufnahmefähigkeit des Bodens für Nährstoffe und Wasser verbessern und die Ertragsfähigkeit des Bodens nachhaltig erhöhen kann.

### 4 Mineralische Sequestrierung

Eine Option zur dauerhaften CO<sub>2</sub>-Sequestrierung bietet die mineralische Bindung – ein Verfahren, bei dem in einer chemischen Reaktion CO<sub>2</sub> in anorganische Karbonate umgewandelt wird. Bei der mineralischen Bindung werden natürliche Prozesse der Gesteinsverwitterung nachgeahmt,

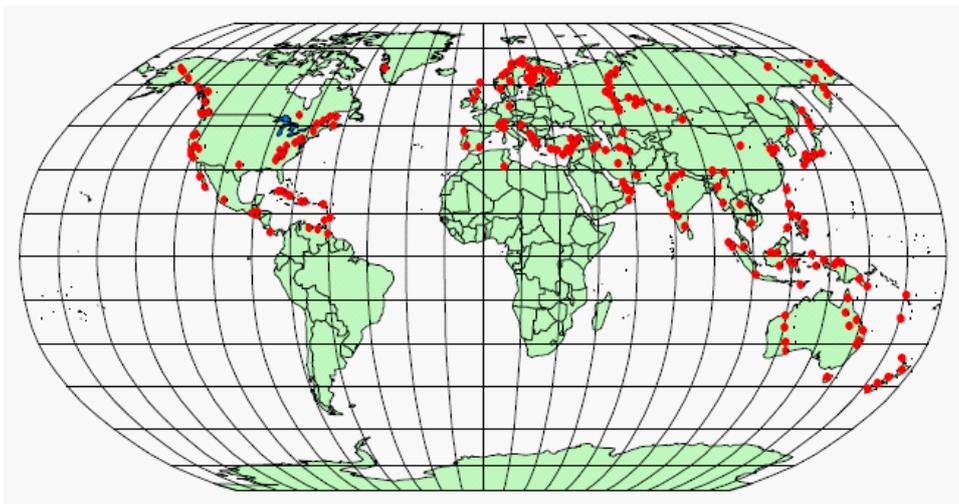
die in der Frühzeit der Erdgeschichte eine wichtige Rolle bei der Reduktion von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre gespielt haben. Als Produkte dieser Verwitterung entstehen Carbonate bestimmter Metalle, die über geologische Zeiträume stabil sind. Diese Methode zur  $\text{CO}_2$ -Speicherung wurde 1990 erstmals durch Seifritz vorgeschlagen (Seifritz 1990). Im Los Alamos National Laboratory wurden hierzu erste umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (Lackner et al. 1995).

Ziel der mineralischen Sequestrierung ist es, natürliche Metalloxide in stabile und damit lagerfähige Carbonat-Produkte umzuwandeln. Von besonderem Interesse sind hierbei die Metalle Calcium und Magnesium, die in der Erdkruste weit verbreitet sind, jedoch selten in der Natur als binäre Oxide ( $\text{CaO}$  bzw.  $\text{MgO}$ ) vorkommen. Da sie häufig in silikatischen Mineralien gebunden sind, werden eine Reihe bestimmter silikatischer Mineralien als potenzielle Ausgangsstoffe für die mineralische Sequestrierung gehandelt. Dabei werden Magnesiumsilikate bevorzugt; dies geschieht nicht nur, weil sie reaktiver sind, sondern weil sie auch höhere Metalloxidgehalte als Calciumsilikate aufweisen und pro Tonne Mineral deutlich mehr  $\text{CO}_2$  binden. Die im oberen Erdmantel am häufigsten vorkommenden Magnesiumsilikate und gesteinsbildenden Minerale sind die Olivine ( $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ ). Olivin ist Hauptbestandteil im

grünen Peridotit, das in Mitteleuropa allerdings selten vorkommt. Die Forschung zur mineralischen Sequestrierung konzentriert sich auf die häufig vorkommenden Serpentine ( $(\text{Mg,Fe,Ni})_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ), die durch Verwitterung von Peridotiten entstanden sind. Die weltweit bekannten Peridotit- und Serpentin-Lagerstätten sind in Abbildung 1 dargestellt. Es wird deutlich, dass diese Mineralien am häufigsten in Regionen mit ultramafischen vulkanischen Gesteinen zu finden sind. In einigen hoch industrialisierten Regionen wie in den USA liegt es in großen Mengen vor.

Die chemisch und mineralisch heterogene Zusammensetzung der Magnesiumsilikate und ihre Begleitung durch andere Mineralien haben zur Folge, dass der nutzbare Magnesiumgehalt und die Reaktivität für eine Carbonisierung sehr unterschiedlich sein können. Die Reaktionen<sup>5</sup> der Olivine bzw. Serpentine mit  $\text{CO}_2$  verlaufen exotherm, d. h. der Prozess läuft ohne Energiezufuhr ab, benötigt aber lange Reaktionszeiten von einigen hunderttausenden Jahren. Die wissenschaftliche und technische Herausforderung für die mineralische Sequestrierung besteht darin, einen niederenergetischen und ökonomisch sinnvollen Weg zu finden, die Carbonisierung relativ schnell verlaufen zu lassen. In den letzten 15 Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, die mineralische Sequestrierung voranzubringen.

**Abb. 1: Bekannte Peridotit- und Serpentin-Lagerstätten**



Quelle: Lackner et al. 1997, S. 21

Insbesondere im Los Alamos National Laboratory (Lackner et al. 1997), im Albany Research Center des U.S. Department of Energy (Gerdemann et al. 2007), in Finnland (Zevenhoven, Kohlmann 2001) und in den Niederlanden (Huijgen et al. 2006) wurden umfangreiche Untersuchungen dazu durchgeführt.

Ein Schlüsselschritt besteht in der Aktivierung der Magnesiumsilikate für deren anschließende Reaktion mit überkritischem CO<sub>2</sub> in gasdicht verschließbaren Druckbehältern (Autoklaven) bei Temperaturen unter 200 °C und unter Drücken zwischen 30 und 200 bar. Hierfür kommen mechanische, thermische und chemische Vorbehandlungsverfahren zum Einsatz (Gerdemann et al. 2007; Teir et al. 2009; Chen et al. 2006).

Die sich in Bezug auf die Reaktionsgeschwindigkeit bisher als effektiv erwiesenen Verfahren haben einen Energiebedarf von 1,1 GJ/t CO<sub>2</sub> (Gerdemann et al. 2007; Huijgen, Comans 2006). Darüber hinaus ist der energetische Aufwand für das Abtrennen und Verflüssigen des CO<sub>2</sub> aus den Kraftwerken oder Industrieanlagen (rd. 200 kWh/t CO<sub>2</sub> nach Bossel 2007) als Voraussetzung für die mineralische Sequestrierung zu berücksichtigen. Eine umfassende Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz für das Verfahren der mineralischen Sequestrierung einschließlich Transport fehlt noch. Es wird jedoch geschätzt, dass der Energieverbrauch für die Sequestrierung mehr als 30 Prozent der Energieerzeugung eines Kraftwerks in Anspruch nimmt. Des Weiteren bedarf es einer Bewertung des Verfahrens anhand von Nachhaltigkeitskriterien. Besondere Bedeutung dürfte dabei dem Abbau der Mineralien und der Lagerung der Produkte zukommen, da diese Prozessschritte mit erheblichen Eingriffen in die Landschaft verbunden sind.

Die Umsetzung des Verfahrens vom Labormaßstab auf großtechnische Verhältnisse stellt eine Herausforderung dar. Dies betrifft insbesondere den Transport der großen Mengen an Mineralien und die hierfür erforderliche Infrastruktur und Logistik sowie die Rückverbringung in geologische Strukturen, da die Produktmenge größer ist als die am „Bergwerk“ entnommene Substratmenge.<sup>6</sup> Einen Ansatz zur Lösung des Entsorgungsproblems hat das Startup-Unternehmen Novacem entwickelt: Über ein Sequestrierungs-Verfahren soll ein

zementäres Bindemittel hergestellt werden, so ihr Konzept. Ein anderes Konzept sieht vor, den Autoklavenprozess so zu konzipieren, dass statt der schwerlöslichen mineralischen Carbonate lösliche Hydrogencarbonate erzeugt werden, die man ins Meer leiten könnte (Lackner 2002; Royal Society 2009). Dies hätte den Vorteil, dass pro Silikat-Molekül zwei Moleküle CO<sub>2</sub> im Meerwasser gebunden wären. Die dadurch erhöhte Hydrogencarbonat-Konzentration des Meerwassers könnte dazu beitragen, der Versauerung des Meerwassers entgegenzuwirken. Inwieweit dies für die Biogeologie (z. B. Plankton, Muscheln, Korallen) von Vorteil sein könnte, ist ungewiss (Royal Society 2009). Allerdings reagieren calcium-anreichernde Organismen wie Muscheln, Seeigel oder Korallen sehr sensibel auf Änderungen der Aragonit-Sättigung des Meeresswassers (Matthews et al. 2009; Feely et al. 2004; Orr et al. 2005).

## 5 Resümee

Die vorgestellten Strategien für ein „Climate Engineering light“ unterscheiden sich von den großtechnischen Mega-Konzepten dadurch, dass sie natürliche bio- und geologische Prozesse zur dauerhaften CO<sub>2</sub>-Bindung bzw. Änderung des Strahlenhaushalts nutzen oder sich an ihnen orientieren. Die Maßnahmen haben i.d.R. einen regionalen Zuschnitt, und ihre Folgen für Mensch und Umwelt scheinen relativ gut abschätzbar. Die CO<sub>2</sub>-Speicherung durch Bäume ist anerkannt und erste Maßnahmen zum Schutz der Tropenwälder (z. B. in der deutschen Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung 2009)<sup>7</sup> wurden ergriffen. Allerdings reichen diese nicht aus, um den Kohlenstoffvorrat in den Wäldern zu sichern und das Potenzial von Bäumen als CO<sub>2</sub>-Senke zu nutzen. Hier besteht Handlungs-, aber auch Forschungsbedarf zur Klärung noch offener Fragen bei der Kohlenstoffbilanzierung sowie der Bewertung zusätzlichen Nutzens der Maßnahmen für Mensch und Umwelt. Die Strategien der bio- und geologischen Sequestrierung stehen noch am Anfang der Entwicklung. Hier besteht in vielen Bereichen noch FuE-Bedarf. Potenzialabschätzungen hinsichtlich des Beitrags dieser Verfahren zur der CO<sub>2</sub>-Speicherung und der

damit verbundenen Kosten sind nicht verfügbar oder mit großen Unsicherheiten behaftet.

Auch wenn bisher keine Aussagen über die Potenziale der Verfahren möglich sind, dürften die einzelnen Ansätze schätzungsweise nur einen begrenzten Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Im Vergleich zu den großtechnischen Vorschlägen zur CO<sub>2</sub>-Speicherung zeichnen sich die regionalen Ansätze dadurch aus, dass sie kleinskalig und gut steuerbar sind. Weil sie im Allgemeinen gesellschaftspolitisch akzeptiert sind, sind sie auch relativ schnell zu implementieren. Des Weiteren leisten sie nicht nur einen Beitrag zum Klimaschutz, sondern bieten teilweise weitere ökologische oder ökonomische Vorteile:

- Erhaltene Wälder und Moore sowie aufgeforstete Flächen können zum Erhalt der Biodiversität und Boden- und Wasserschutz beitragen.
- Biokohle kann die Bodenqualität verbessern und die Flächenerträge steigern.
- Die mineralische Sequestrierung kann bei der Herstellung zementärer Bindemittel eingesetzt werden.

Diese zusätzlichen Nutzenaspekte sollten stärker Eingang finden in die Bewertung der Verfahren zum Klimaschutz, denn sie können helfen, die Kosten der CO<sub>2</sub>-Speicherung zu verringern und die Akzeptanz zu erhöhen. Das sollte bei der strategischen Ausrichtung der FuE-Politik und von Fördermaßnahmen zum Klimaschutz zukünftig stärker berücksichtigt werden.

## Anmerkungen

- 1) Diese Darstellung der Strategien und die Identifikation komplementärer Forschungsfragen basieren auf Forschungsergebnissen, die im BMBF-Projekt „Roadmap Umwelttechnologien 2020“ erarbeitet wurden (Schippl et al. 2009; Schippl, Rösch 2010).
- 2) Siehe zum Greenhouses Geo-Engineering [http://issuu.com/reflectiveplanet/docs/greenhouse\\_geo-engineering](http://issuu.com/reflectiveplanet/docs/greenhouse_geo-engineering).
- 3) Die Evaporation ist ein meteorologischer Begriff, der die Verdunstung von Wasser auf unbewachsenem und in diesem Sinn freiem Land oder Wasserflächen bezeichnet.

- 4) Zum Global-Cooling-Projekt siehe <http://www.theglobalcoolingproject.com/>
- 5) Für Olivine gilt folgende Reaktion- und Wärmeerzeugung:  $1/2 \text{ Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{CO}_2 = \text{MgCO}_3 + 1/2 \text{ SiO}_2$  -95 kJ/mol, für Serpentine entsprechend:  $1/3 \text{ Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{CO}_2 = \text{MgCO}_3 + 2/3 \text{ SiO}_2 + 2/3 \text{ H}_2\text{O}$  -64 kJ/mol.
- 6) Ein Beispiel: Ein Kraftwerk mit einer Leistung von 1 GW benötigt zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung jährlich 15 Mio. t Olivin und erzeugt daraus 22 Mio. t „Produkte“.
- 7) Der komplette Name lautet „Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen“ (BGBl. I 3182).

## Literatur

*anonym*, 2010: Grüne Kohle aus feuchter Biomasse. Magazin innovation & energie. Publikation der EnergieAgentur. NRW, S.10

*Bossel, U.*, 2007: Der Weg in eine nachhaltig gestaltete Energiezukunft, Perspektiven einer nachhaltigen Energiewirtschaft. Arbeitskreis nachhaltige Energiewirtschaft, 9. bis 11. Mai 2007, Saig (Schwarzwald); [http://www.koord.hs-mannheim.de/AK-NEW/Vortrag\\_Bossel.pdf](http://www.koord.hs-mannheim.de/AK-NEW/Vortrag_Bossel.pdf) (download 13.7.10)

*Campra, P.; Garcia, M.; Canton, Y.; Palacios-Orueta, A.*, 2008: Surface Temperature Cooling Trends and Negative Radiative Forcing Due to Land Use Change Toward Greenhouse Farming in Southeastern Spain. In: Journal of Geophysical Research 113 (2008), D18109, doi: 10.1029/2008JD009912

*Charisius, H.*, 2010: Für eine Handvoll Kohlenstoff. In: Technology Review Januar 2010, S. 38–42

*Chen, Z.Y.; O'Connor, W.K.; Gerdemann, S.J.*, 2006: Chemistry of Aqueous Mineral Carbonation for Carbon Sequestration and Explanation of Experimental Results. In: Environmental Progress 25/2 (2006), S. 161–166

*Diaz, S.; Hector, A.; Wardle, D.A.*, 2009: Biodiversity in Forest Carbon Sequestration Initiatives: Not Just a Side Benefit. In: Current Opinion in Environmental Sustainability 1/1 (2009), S. 55–60

*FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Hg.)*, 2010: Global Forest Resources Assessment 2010. <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/> (download 14.7.10)

*Feely, R.A.; Sabine, C.L.; Lee, K. et al.*, 2004: Impact of Anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> System in the Oceans. In: Science 305 (2004), S. 362–366

- Fleming, J.R.*, 1998: Historical Perspectives on Climate Change. Oxford
- Gaunt, J.; Lehmann, J.*, 2008: Energy Balance and Emissions Associated with Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production. In: Environmental Science and Technology 42 (2008), S. 4152–4158
- Gerdemann, S.J.; O'Connor, W.K.; Dahlin, D.C. et al.*, 2007: Ex Situ Aqueous Mineral Carbonation. In: Environmental Science & Technology 41 (2007), S. 2587–2593
- Hamwey, R.M.*, 2007: Active Amplification of the Terrestrial Albedo to Mitigate Climate Change: An Exploratory Study. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12 (2007), S. 419–439; [http://issuu.com/reflectiveplanet/docs/greenhouse\\_geoen-gineering](http://issuu.com/reflectiveplanet/docs/greenhouse_geoen-gineering) (download 22.7.10)
- Heilmann, S.M.; Ted Davis, H.; Jader, L.R. et al.*, 2010: Hydrothermal Carbonization of Microalgae. In: Biomass and Bioenergy 34/6 (2010), S. 875–882
- Huijgen, W.; Comans, R.*, 2006: Carbon Dioxide Sequestration by Mineral Carbonation. Literature review update 2003–2004, Energy Research Centre of the Netherlands, ECN-C--05-022; <http://www.ecn.nl/publicaties/default.aspx?nr=ECN-C--05-022> (download 13.7.10)
- Huijgen, W.J.J.; Ruijg, G.J.; Comans, R.N.J.; Witkamp G.J.*, 2006: Energy Consumption and Net CO<sub>2</sub> Sequestration of Aqueous Mineral Carbonation. In: Industrial & Engineering Chemistry Research 45 (2006), S. 9184–9194
- Körner, Chr.*, 2009: Biologische Kohlenstoffsinken: Umsatz und Kapital nicht verwechseln! In: GAIA 4 (2009) Schwerpunkt: CCS (Teil 2), S. 288–293
- Kueppers, L.M.; Snyder, M.A.; Sloan, L.C.*, 2007: Irrigation Cooling Effect: Regional Climate Forcing by Land-use Change. In: Geophysical Research Letters 34 (2007), L03703, doi:10.1029/2006GL028679; <http://www.theglobalcoolingproject.com/> (download 22.7.10)
- Lackner, K.S.*, 2002: Carbonate Chemistry for Sequestration Fossil Carbon. In: Annual Review of Environment and Resources 27 (2002), S. 193–232
- Lackner, K.S.; Butt, D.P. Wendt, C.H. et al.*, 1997: Carbon Dioxide Disposal in Mineral Form Keeping Coal Competitive. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-97-2094, November 1997
- Lackner, K.S.; Wendt, C.H.; Butt, D.P. et al.*, 1995: Carbon Dioxide Disposal in Carbonate Minerals. In: Energy 20 (1995), S. 1153–1170
- Lehmann, J.; Gaunt, J.; Rondon, M.*, 2006: Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. In: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 11 (2006), S. 403–427
- Lippelt, J.*, 2010: Kurz zum Klima: Klimakiller Abholzung? In: ifo Schnelldienst 63/01 (2010), S. 44–46
- Matthews, H.D.; Cao, L.; Caldeira, K.*, 2009: Sensitivity of Ocean Acidification to Geoengineered Climate Stabilization, In: Geophysical Research Letters 36 (2009), L10706, doi: 10.1029/2009GL037488
- Nunery, J.S.; Keeton, W.S.*, 2010: Forest Carbon Storage in the Northeastern United States: Net Effects of Harvesting Frequency, Post-harvest Retention, and Wood Products. In: Forest Ecology and Management 259/8 (2010), S. 1363–1375
- Orr, J.C.; Fabry, V.J.; Aumont, O. et al.*, 2005: Anthropogenic Ocean Acidification over the Twentyfirst Century and its Impact on Calcifying Organisms. In: Nature 437 (2005), S. 681–686
- Pielke, R.A.; Marland, G.; Betts, R.A. et al.*, 2002: The Influence of Land-use Change and Landscape Dynamics on the Climate System: Relevance to Climate-change Policy Beyond the Radiative Effect of Greenhouse Gases. In: Philosophical Transactions of the Royal Society 360 (2002), S. 1–15
- Reijnders, L.*, 2009: Are Forestation, Bio-char and Landfilled Biomass Adequate Offsets for the Climate Effects of Burning Fossil Fuels? In: Energy Policy 37/8 (2009), S. 2839–2841
- Ridgwell, A.; Singarayer, J.S.; Hetherington, A.M.; Valdes, P.J.*, 2009: Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering. In: Current Biology 19 (2009), S. 146–150
- Rösch, Chr.; Skarka, J.; Patyk, A.*, 2009: Microalgae – Opportunities and Challenges of an Innovative Energy Source. In: Congress Center Hamburg (CCH) (Hg.): From Research to Industry and Markets. Proceedings zur 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29.6.–3.7.2009. Hamburg: Congress Center 2009, 7 Seiten
- Röthlein, B.*, 2006: Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf. In: Wissenschaftsmagazin MaxPlanckForschung 2 (2006), S. 20–26
- Royal Society*, 2009: Geoengineering the Climate. Science, Governance and Uncertainty. London; <http://royalsociety.org/Geoengineering-the-climate/> (download 13.7.10), S. 2839–2841

*Schippl, J.; Grunwald, A.; Hartlieb, N. et al.*, 2009: Roadmap Umwelttechnologien 2020. In: Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7519, Karlsruhe

*Schippl, J.; Rösch, Chr.*, 2010: Optionen und Technologien zur Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>. Potentiale und Forschungsbedarf. Vertiefungsstudie im Rahmen des Projekts Roadmap Umwelttechnologien 2020. Karlsruhe

*Seifritz, W.*, 1990: Der Treibhauseffekt. Technische Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Entsorgung. München

*Teir, S.; Eloneva, S.; Fogelholm, C.; Zevenhoven, R.*, 2009: Fixation of Carbon Dioxide by Producing Hydromagnesite from Serpentine. In: Applied Energy 86 (2009), S. 214–218

*Tredici, M.R.*, 2010: Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution. In: Biofuels 1/1 (2010), S. 143–162

*Zevenhoven, R.; Kohlmann, J.*, 2001: CO<sub>2</sub> Sequestration by Magnesium Silicate Mineral Sequestration in Finland. Second Nordic Minisymposium on Carbon Dioxide Capture and Storage, Göteborg, October 26, 2001; <http://www.entek.chalmers.se/~anly/symp/symp2001.html> (download 13.7.10)

## Kontakt

Dr. Christine Rösch  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)  
Postfach 36 40, 76021 Karlsruhe  
Tel.: +49 (0) 72 47 / 82 – 27 04  
Fax: +49 (0) 72 47 / 82 – 48 06  
E-Mail: [christine.roesch@kit.edu](mailto:christine.roesch@kit.edu)

« »

## Informationen zum ITAS

Das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) im Karlsruher Institut für Technologie erarbeitet und vermittelt Wissen über die Folgen menschlichen Handelns und ihre Bewertung in Bezug auf die Entwicklung und den Einsatz von neuen Technologien. Alternative Handlungs- und Gestaltungsoptionen werden entworfen und bewertet. ITAS unterstützt dadurch Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und die Öffentlichkeit, Zukunftsentscheidungen auf der Basis des besten verfügbaren Wissens und rationaler Bewertungen zu treffen. Zu diesem Zweck wendet ITAS Methoden der Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse an und entwickelt diese weiter. Untersuchungsgegenstände sind in der Regel übergreifende systemische Zusammenhänge von gesellschaftlichen Wandlungsprozessen und Entwicklungen in Wissenschaft, Technik und Umwelt. Das Institut erarbeitet sein Wissen vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Probleme und Diskurse sowie anstehender Entscheidungen über Technik. Relevante gesellschaftliche Akteure werden in den Forschungs- und Vermittlungsprozess einbezogen. Außerdem greift das ITAS die Problematik der Bewertung von Technik und Technikfolgen mit wissenschaftlichen Mitteln auf. Die Forschungsarbeiten des Instituts haben grundsätzlich einen prospektiven Anteil. Es geht – im Sinne der Vorsorgeforschung – um Vorausschau der Folgen menschlichen Handelns, sowohl als Vorausschau soziotechnischer Entwicklungen (Foresight) als auch als Abschätzung künftiger Folgen heutiger Entscheidungen. Als Richtschnur gilt, dass die Forschungsergebnisse in unterschiedlichen, alternativen Handlungs- und Gestaltungsoptionen gebündelt und in Bezug auf ihre Folgen und Implikationen rational bewertet werden. Das Internetangebot des Instituts finden Sie unter <http://www.itas.fzk.de>.