

Thinktank Project 0510

WWW.PYRRHUS.DE

Assimilierung und Fixierung von
atmosphärischem CO₂
V. 1.0



PYRRHUS:DE

Assimilierung und Fixierung von atmosphärischem CO₂

WWW.PYRRHUS.DE

Thinktank-Projekt 0510

Autor:

Frank Szemkus, im Mai 2010

„Das schwarze Wasser gehört Mutter Erde. Wir sollten es nicht anrühren.“
(Jakaris Vater aus dem Zeichentrick für Kinder)



Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	3
Der natürliche Kohlendioxid-Kreislauf.....	3
Der Verlauf der Kohlendioxidkonzentration.....	4
Biologische CO ₂ -Assimilierung.....	5
Wiederaufforstung.....	5
Wiederaufforstung von Regenwäldern.....	5
Steppen- und Wüstenregionen.....	6
Gemäßigte Breiten.....	6
Weitere Maßnahmen.....	6
Renaturierung von Hochmooren.....	7
Einstellung der Müllverbrennung.....	7
Künstliche CO ₂ -Assimilation.....	8
Ausblick – Eine Si/C-Industrie.....	9
Anhang.....	10
Eigenschaften von CO ₂	10
Möglichkeiten der synthetischer CO ₂ -Assimilation.....	10
Referenzen.....	13



Einleitung

Die durch den Kohlendioxidausstoß einhergehende globale Erderwärmung, verursacht durch die Spezies 'Mensch', ist in der zurückliegenden neueren Erdgeschichte der letzten 5 Millionen Jahre ohne Beispiel. Gebundener fossiler Kohlenstoff, enthalten in Erdöl, Erdgas, Braun- und Steinkohle, wird durch Verbrennung in Kohlendioxid (CO₂) umgewandelt und in immer größeren Mengen in die Atmosphäre eingebracht. Kohlendioxid, ein sog. Treibhausgas, ist für die globale Erderwärmung verantwortlich. Ein anderer Teil des Kohlendioxids wird von den Ozeanen aufgenommen und führt auch dort zu negativen Veränderungen: Das CO₂ löst sich z. T. im Wasser und lässt durch Bildung von Kohlensäure den pH-Wert der Meere und Ozeane ansteigen. Die Meeresversäuerung führt zu einer Beeinträchtigung vieler kalkschalenbildenden Organismen. Da viele dieser Lebewesen auf einer unteren Stufe der Nahrungskette stehen, sind durch deren Dezimierung bzw. Aussterben erhebliche Auswirkungen auf die globalen Ökosysteme zu befürchten. Insbesondere Korallenriffe gelten in dieser Beziehung als sehr verwundbar [01]. Außerdem scheint alles darauf hinzudeuten, dass in den Ozeanen aufgrund von Sättigungseffekten die CO₂-Assimilationsfähigkeit stetig abnimmt [02]. Durch die verminderte CO₂-Aufnahmefähigkeit der Meere und Ozeane verbleiben immer größere Mengen Kohlendioxid in der Atmosphäre.

Auch der Abbau und der Transport von Kohle, Erdöl und Erdgas ist mit großen Risiken für die Ökosysteme verbunden, wie die Katastrophen der Exxon Valdez, die Havarie im Great Barrier Reef und die Deepwater-Horizon- Katastrophe im Golf von Mexiko belegen.

Die vom Klimawandel bzw. der globalen Erwärmung verursachten Schäden werden ab einer Erhöhung von 2° Celsius nicht mehr kalkulierbar [03]. Man geht in der Tat davon aus, dass diese Schranke aufgrund unzureichender Klimaschutzmaßnahmen im Laufe dieses Jahrhunderts deutlich überschritten wird [04].

Ziel der gegenwärtigen Maßnahmen zur Eindämmung des anthropogenen (vom Menschen verursachten) Klimawandels ist die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von Kraftwerken, Industrieproduktion und dem Straßenverkehr. Die CO₂-Reduktion soll durch einen insgesamt bessere Energieeffizienz der Industrie- und Schwellenländer und der gleichzeitige Ausbau von regenerativen Energien über Sonne und Wind erreicht werden – ohne den Einsatz der Atomindustrie [05]. Doch der zur Zeit einzige nennenswerte Beitrag zu CO₂-Reduktion ist eher unfreiwillig und der globalen Wirtschaftskrise zu verdanken [06].

Das bisher freigesetzte Kohlendioxid wird über mehrere tausend Jahre in der Atmosphäre verweilen und den Treibhauseffekt weiter anheizen [07]. Um der Erderwärmung wirksam entgegenzutreten und eine mittelfristige signifikante Absenkung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zu erreichen, sind nach Meinung des Autors die bisherigen Maßnahmen zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes bei weitem nicht ausreichend. Vielmehr sind neben der Verminderung der CO₂-Emissionen zusätzliche konzentrierte globale CO₂-Assimilierungsmaßnahmen erforderlich, um die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre innerhalb von Dekaden effizient zu senken. Bei diesen Maßnahmen wird durch künstliche oder natürliche Vorgänge der Atmosphäre (und/oder den Ozeanen) Kohlendioxid entzogen und dauerhaft gebunden.

Der durch die Assimilation von CO₂ zur Verfügung stehende Rohstoff Kohlenstoff (z.B. gebunden in Form von Holz) kann (im Zusammenwirken mit Silizium) die Basis bilden für ein profitables Industrie- und Wirtschaftssystem, welches Kohlenstoff und Silizium zu hochwertigen Werkstoffen (z.B. CFK, Kunststoffe) aufbereitet. Die Verfeuerung von Kohlenstoff ist zu ächten – ebenso die energieintensive Veredelung vieler Metalle mit Hilfe fossiler Energieträger.

Der natürliche Kohlendioxid-Kreislauf

Der natürliche CO₂-Kreislauf kann als einer der ältesten Prozesse des Lebens auf der Erde angesehen werden. Grundlage ist ein chemischer Umwandlungs- und Gleichgewichtsprozess zwischen Kohlenstoff und Kohlendioxid auf Basis organischer Reaktionen. Eine Schlüsselrolle spielt dabei das Blattgrün der Pflanzen –



das Chlorophyll. Es ermöglicht mit Hilfe des Sonnenlichts eine Aufspaltung von Kohlendioxid in Kohlenstoff und Sauerstoff. Bisher ist keine vom Menschen errichtete Apparatur imstande, dies zu leisten, ohne an irgendeiner Stelle Kohlendioxid freizusetzen. Der durch den Umwandlungsprozess zur Verfügung stehende Kohlenstoff wird für das Pflanzenwachstum (dem Bilden neuer Zellen) verwendet – der Sauerstoff wird an die Atmosphäre als 'Abfallprodukt' abgegeben. Tierische Lebensformen benötigen sowohl den Sauerstoff als auch den in den Pflanzen gebundenen Kohlenstoff. Kohlendioxid entsteht hier beim Atmungsprozess; ebenso beim Verrotten pflanzlichen oder tierischen Materials. Hier schließt sich der Kreislauf.

Bei genauerer Betrachtung treten jedoch weitere Effekte hinzu: Dem CO₂-Kreislauf kann auch langfristig Kohlenstoff entzogen werden, wenn die Verrottungsprozesse vom Luftsauerstoff abgeschnitten werden (z.B. auf dem Grunde von sauerstoffarmen Gewässern und Mooren oder Abkapselung durch überdeckendes Material; etwa bei Überschwemmungen usw.) In diesem Fall kann der von der Atmosphäre entzogene organische Material in der Erdkruste auf Jahrtausende verbleiben. Torf, Braun- und Steinkohle, Erdöl und Erdgas sind auf diese Weise entstanden. In der Erdkruste und im Erdmantel gibt es aber auch natürliche geophysikalische Kräfte, die zu einem plötzlichen Eintrag von Kohlendioxid in die Atmosphäre führen können; etwa durch Vulkanausbrüche oder tektonische Effekte.

Wie man unschwer erkennt, herrscht zwischen der Atmosphäre, der Hydrosphäre (den Ozeanen) und der Lithosphäre (der festen Erde) ein komplexes Wechselspiel von Erzeugung, Abbau und Speicherung von Kohlendioxid, Sauerstoff und Kohlenstoff (-Verbindungen). In dieses Wechselspiel greift seit der Industrialisierung der Mensch ein, indem er in der Erdkruste gebundenen Kohlenstoff in großen Mengen in die Erdatmosphäre und in die Ozeane einbringt und damit das Gleichgewicht zwischen CO₂-Bindung – und Erzeugung empfindlich stört.



Der Verlauf der Kohlendioxidkonzentration

Durch verschiedene Verfahren, etwa durch Eiskernbohrungen, kann festgestellt werden, wie sich die Zusammensetzung der Atmosphäre innerhalb der letzten zehntausend Jahren veränderte. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass seit dem Ende der letzten Eiszeit die atmosphärische Kohlendioxidkonzentration bei ca. 380 ppm mit einer natürlichen Schwankungsbreite von ± 30 ppm in relativ konstanten Bahnen verlief [08]. Seit Beginn der Industrialisierung ist ein Ansteigen der CO₂-Konzentration zu beobachten. Diese Zunahme ist mit jeder weiteren Dekade stärker angestiegen. Die durch den Anstieg heute erreichte CO₂-Konzentration auf 580 ppm als auch die Dynamik der Zunahme der CO₂-Konzentration stellt selbst im Vergleich geologischer Zeitmaßstäbe ein extremes Ereignis dar (s. Abbildung 1).

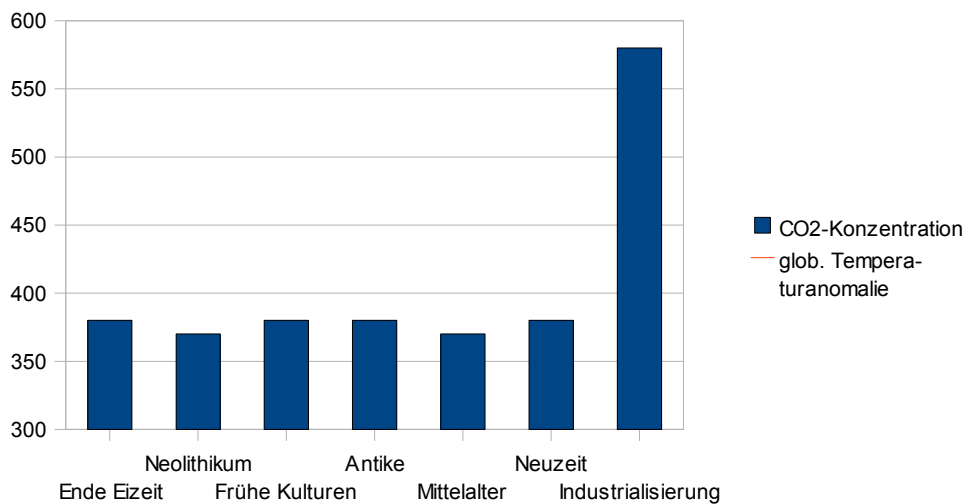


Abbildung 1: Verlauf der CO₂-Konzentration der letzten 10000 Jahre



Einhergehend mit dem geradezu explosionsartigen Anstieg der CO₂-Konzentration der Atmosphäre innerhalb weniger Dekaden ist ein ebenso bemerkenswerter Anstieg der globalen Temperaturanomalie zu beobachten (Abb.). Bis auf einer kurzzeitigen Stagnation zwischen 1950 und 1970, die auf Aerosoleinträge (Höhepunkt der Luftverschmutzung durch Schwebstoffe) zurückzuführen ist, ist eine ungebrochen steigender Trend zu beobachten. Eine Begrenzung der globalen Temperaturanomalie auf 2° Celsius ist aufgrund der dynamischen Entwicklung nicht mehr auszuschließen.



Biologische CO₂-Assimilierung

Eine signifikante Verringerung der atmosphärischen Kohlendioxidkonzentration innerhalb des 21. Jahrhunderts kann nicht nur allein durch Reduzierungsmaßnahmen der CO₂-Emissionen erreicht werden sondern muss durch einen gleichzeitigen Entzug und Binden (fixieren) von Kohlendioxid aus der Atmosphäre flankiert werden. Die CO₂-Assimilation kann prinzipiell auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen:

Grundlage der biologischen CO₂-Assimilierung bildet der natürliche CO₂-Kreislauf (s.o.). Biologische Fixierungsmaßnahmen nutzen mit Hilfe von Pflanzenwachstum die natürliche Photosynthese, bei der zum Zellwachstum notwendige Kohlenstoff über das Kohlendioxid der Atmosphäre in den Pflanzen gebunden wird. Es ist nun entscheidend, dass dieser gebundene Kohlenstoff langfristig der Atmosphäre entzogen bleibt – das bedeutet, dass das durch Anpflanzungen und Aufforstungen entstandene biologische Material der Verbrennung bzw. Verrottung langfristig entzogen wird. Vielmehr ist eine industrielle Weiterverarbeitung des Kohlenstoffs auf Basis regenerativen Energien zur höherwertigen Stoffen (CFK, Kunststoffe) anzustreben.

Wiederaufforstung

Wiederaufforstungsmaßnahmen stellen eine wesentliche Säule der biologischen Fixierung von atmosphärischen CO₂ dar. Der im Kohlendioxid enthaltene Kohlenstoff wird über Jahrzehnte im Holz gebunden. Natürlich gewachsener Wald ist weiterhin die Basis für Ökosysteme, bestehend aus pflanzlichen und tierischen Gemeinschaften, die wiederum zusätzliches Kohlendioxid binden können. Wiederaufforstung kommt somit nicht nur der Verminderung der atmosphärischen CO₂-Konzentration zu Gute, sondern liefert die Grundlage für einen gezielten Artenschutz. In gemäßigten Breiten bieten Wälder im Rahmen eines nachhaltigen Nutzungskonzepts zusätzliche Bewirtschaftungsmöglichkeiten.

Allerdings ist zu erwähnen, dass Wiederaufforstungen nur für einen langen Zeitraum angelegt sind und sie bieten daher keinen kurzfristigen Ausweg zur Assimilation von Kohlendioxid.

Wiederaufforstung von Regenwäldern

Weltweit verschwindet pro Minute eine Fläche von mehreren Hektar. Eine Wiederaufforstung von zerstörtem Regenwald ist extrem schwierig, da Regenwälder auf relativ nährstoffarmen Böden wachsen. Intakte Regenwälder bilden einen in sich geschlossenen Wasser- und Nährstoffkreislauf – Nährstoffverluste, die in den Waldboden gelangen und ihn mit Nährstoffen anreichern, sind gering. Weiterhin ist nach Zerstörung des Regenwaldes der brachliegende Boden starker (tropischer) Erosion ausgesetzt und verliert spätestens in diesem Vernichtungsstadium die durch Brandrodung eingebrachten Restnährstoffe. Und angesichts des immer noch andauernden Raubbaus an den Regenwäldern ist es eine Herkulesaufgabe, eine Renaturierung abgeholzter Flächen anzustreben.

Ursachen der Regenwaldzerstörung ist zum Einen die zunehmende Bevölkerung insbesondere in der südlichen Hemisphäre, die Flächen für den landwirtschaftlichen Anbau benötigt, andererseits aber auch der Raubbau der Industrienationen, um ihren Bedarf an Edelhölzern und Bodenschätzen zu befriedigen und der immer mehr zunehmende Anbau an Palmölplantagen. Paradoxerweise wird letzterer ursprünglich als 'Klimaschutzmaßnahme' begriffen, um CO₂-neutrale Kraftstoffe zu gewinnen. Palmölanbau wird immer noch von den Industrienationen, auch von der deutschen Wirtschaft, gefördert.

Ein Umdenken ist hier kurzfristig zwingend erforderlich. Aufbau statt Abholzen von Regenwald ist von globalen ökonomischen und ökologischen Nutzen und daher massiv von der Internationalen Gemeinschaft voranzutreiben.



Steppen- und Wüstenregionen

Die Ausbreitung der Wüsten und Trockengebiete ist zu einem großen Teil dem Menschen geschuldet. Der immer noch andauernde Bevölkerungsanstieg in den Entwicklungsländern führt zur Sicherung des Existenzminimums zu einem hohen Bedarf an Brennholz und landwirtschaftlichen Nutzflächen. Das Abholzen des Baumbestandes zur Brennholzbeschaffung aus der Not heraus bietet jedoch nur einen kurzzeitigen Nutzen, da mehr Bäume abgeholzt als nachwachsen konnten. Außerdem entsteht durch die flächenhafte Abholzung in den Trockenregionen ein sich aufschaukelnder Versteppungseffekt, da die Wasserspeicherung des Bodens und die Bodenbeschaffenheit selbst durch die Abholzung beeinträchtigt und das Überleben des verbliebenen Baumbestandes erschwert wird.

Wiederaufforstungsmaßnahmen heimischer Baumarten in den von Abholzung betroffenen trockenen Regionen sind auch hier von mannigfaltigen positiven Quereffekten begleitet. So sind trockenheitsresistente Bäume wertvolle Schattenspenden und schützen die Böden vor Austrocknung und Erosion und heben den Grundwasserspiegel. Darüber hinaus sind die Früchte vieler Baumarten aus den Trockenregionen (z.B. Olivenbäume) begehrte Handelswaren und Rohstoffe. Auch Regenwasser wird von den Bäumen aufgenommen und versickert nicht ungenutzt im Boden, sondern wird in der Nähe der Oberfläche gehalten. So wird neben dem Kohlendioxid der Luft auch Wasser gebunden. Eine bodendeckende Nährstoffschicht kann entstehen.

Wälder sind die Basis von Ökosystemen und bieten den Menschen in diesen Regionen vielfältige Möglichkeiten zur nachhaltigen Nutzung der Ressource Wald.

Gemäßigte Breiten

Anbau landwirtschaftlicher Nutzpflanzen

Globalisierung, Überproduktion und Preisdruck zwingen immer mehr Landwirte insbesondere in den Industrieregionen zur Massentierhaltung. Vielerorts ist durch die intensive Bewirtschaftung die Qualität von Grundwasser, Oberflächengewässer und Flüssen durch das Ausbringen von Gülle und Düngemitteln und Rückständen von z.B. Antibiotika stark beeinträchtigt.

Die Wiederaufforstung führt nicht nur wie in den vorangegangenen Abschnitten erklärt zu einer verbesserten Assimilation von Kohlendioxid. Eine Abkehr von der subventionierten Massentierhaltung hin zu einem nachhaltigen Land- und Forstbewirtschaftungssystem bietet u.a. als Kohlenstofflieferant für industriell veredelte Produkte, die bisher von der Schwerindustrie, etwa der Metallverarbeitung oder der Erdölindustrie) bedient wurden, ganz neue Perspektiven. Weitere Möglichkeiten liegen im Ausbau von Natur- und Artenschutz und des Fremdenverkehrs.

Weitere Maßnahmen

Neben der Wiederaufforstung besteht für bisher landwirtschaftlich intensiv genutzte Flächen die Möglichkeit des Anbaus von schnellwachsenden Pflanzen (etwa Raps, Mais, Gehölze). Nach der Ernte kann der enthaltene Kohlenstoff aus den Pflanzenabfällen z.B. durch Verschmelzung unter Ausschluss von Sauerstoff gewonnen und der industriellen Weiterverarbeitung zugeführt werden.

Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Wiederaufforstung ist eine wesentlich schnellere Kohlendioxidassimilierung: Während Wälder Jahrzehnte benötigen, um Kohlendioxid nennenswert zu binden, lassen sich mit Nutzpflanzen der Klasse C10 und höher (etwa Raps oder Mais) innerhalb einer Saison aufgrund des schnellen Pflanzenwachstums größere Mengen von Kohlendioxid binden.

Nachteile dieser Methode ist die intensive landwirtschaftliche Nutzung mit den o.g. Beeinträchtigungen der Umwelt und eine inhärente Abholzungsgefahr für Regenwälder – ähnlich wie bei dem Anbau von Palmölpflanzen – und ein erhöhter CO₂-Verbrauch bei der Bewirtschaftung der Flächen Gerade dieser CO₂-



Verbrauch kann die Bemühungen bei der CO₂-Assimilierung der Nutzpflanzen zunichte machen.

Renaturierung von Hochmooren

Hochmoore wandeln abgestorbenes organisches Material, hauptsächlich von Pflanzen, unter Ausschluss von Sauerstoff in Torf um, das über einen langen Zeitraum Ablagerungsschichten von mehreren Metern Stärke erreicht. Torf stellt die Vorstufe zur Entstehung von Braun- und Steinkohle dar. Hochmoore kann man daher als natürliche Endlagerstätten organischen Materials bezeichnen. Sie beherbergen darüber hinaus eine Vielzahl an bedrohten Arten, die in diesem Ökosystem spezielle Anpassungen ausgebildet haben und nur hier überleben können.

Durch die Trockenlegung und Ausbeutung der Moore durch Torfabbau wird dieser Einlagerungsprozess unterbrochen. Beim Verbrennen des Torfes wird das darin gebundene CO₂ erneut in die Atmosphäre eingebracht und die CO₂-Assimilierung aufgehoben. Doch gerade im Rahmen der CO₂-Assimilierung sind Hochmoore gänzlich neu zu bewerten. Sie dienen nicht mehr als Brennstofflieferanten sondern als oberflächennahe Lagerstätten für Kohlendioxid. Ihre Renaturierung ist mit allen Mitteln voranzutreiben.

Einstellung der Müllverbrennung

Die Müllverbrennung dient heute der Wärme- und Energiegewinnung aus Reststoffen und dem Abbau der täglich anfallenden Müllberge. Ökologisch betrachtet sind Müllverbrennungsanlagen als CO₂-emittierende Kraftwerke auf Erdölbasis zu betrachten: Ein Großteil des anfallenden Mülls besteht aus Kunststoffen, die letztendlich aus Erdöl gewonnen wurden. Damit sind Müllverbrennungsanlagen den als kritisch einzustufenden Braun- und Steinkohlekraftwerken zuzuordnen, deren Abschaltung aus Klimaschutzgründen zwingend erforderlich ist. Eine Einstellung der Müllverbrennung von Reststoffen der Konsumgüterindustrie erfordert jedoch ein Umdenken in Bezug auf eine nachhaltige Müllvermeidung und ein wesentlich umfassenderes Recycling-Konzept. Zukünftig ist bei der Kunststoffherstellung und Polymerisation auf Erdöl als Ausgangsbasis zu verzichten und stattdessen auf CO₂-neutrale biologisch abbaubare Kunststoffe auszuweichen (z.B. die lange bekannten Caseine [09]). Weiterhin müssen diese 'neuen' Kunststoffe, die teilweise schon mehr als 100 Jahre bekannt sind, schadstofffrei (z.B. Chlor) und kompostierbar sein.

Auf Erdölbasis hergestellte Kunststoffe dürfen nicht mehr verfeuert werden, sondern müssen von Schadstoffen gereinigt und aufgrund ihrer Haltbarkeit z.B. in Endlagerstätten deponiert oder als Baumaterial verwendet der Verfeuerung in Müllverbrennungsanlage langfristig entzogen werden.



Künstliche CO₂-Assimilation

Künstliche CO₂-Assimilationsmaßnahmen sind heute Gegenstand intensiver Forschungsarbeit. Vielfach orientiert man sich an natürlichen Prozessen und sucht nach Optimierungsmethoden zur CO₂-Assimilierung – ebenfalls unter alleiniger Verwendung von Sonnenlicht als Energiequelle. Neben der pflanzlichen Photosynthese sind noch andere natürliche Varianten möglich, die z.B. bei anaeroben Bakterien auftreten [10]. In industriellem Maßstab anwendbare Methoden hat die Forschung bisher nicht hervorgebracht. So reagiert Kohlendioxid bekannter Maßen etwa mit Wasserstoff, allerdings erst bei hohen Drücken und Temperaturen. Die gewonnenen Endprodukte sind allerdings giftig (Methanol, Kohlenmonoxid) können jedoch zu ungiftigen Werk/Kunststoffen weiterverarbeitet werden. Alternativ wird mit künstlich synthetisierten organischen Katalysatoren experimentiert, um CO₂ aufzubrechen und zu fixieren [11].

Gelänge es, in Ergänzung der natürlichen Prozesse die CO₂-Fixierung im Hinblick auf Geschwindigkeit und Massenumsatz mit Hilfe regenerativer Energie zu beschleunigen, sind industrielle CO₂-Assimilations-Stationen denkbar, die der Atmosphäre (oder auch den Ozeanen) über Jahre hinweg überschüssiges CO₂ entziehen, den darin enthaltenen Kohlenstoff chemisch fixieren und einer industriellen Nutzung als Rohstoff zur Verfügung stellen. Diese Stationen könnten überall dort aufgestellt werden, wo regenerative Energie in genügendem Maße vorhanden ist, beispielsweise mit Hilfe von solarthermischen Anlagen in den Wüstengebieten unserer Erde – (Desertec-Projekt [12]).



Ausblick – Eine Si/C-Industrie

Zur Assimilation und dauerhaften Fixierung von CO₂ stehen, wie aus den vorhergehenden Abschnitten hervorgeht, im Prinzip zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Die Nutzung natürlicher CO₂-Assimilationsvorgänge im Rahmen von langfristig angelegten Wiederaufforstungsmaßnahmen und/ die Entwicklung von Technologien zur synthetischen Assimilation von CO₂ auf Basis organischer oder anorganischer Reaktionen und regenerativer Energien.

Gebundener Kohlenstoff und Silizium als Ausgangsbasis industrieller Nutzung

Praktisch anwendbar und auch im großflächigen Maße umsetzbar sind heute nur CO₂-Fixierungen im Rahmen von umfangreichen Wiederaufforstungsprogrammen. Vielfach stehen diesem jedoch wirtschaftliche Interessen und kurzfristiges Profitdenken entgegen, wie etwa der Anbau von Palmölplantagen in den Regenwaldregionen zeigt. Wiederaufforstung mit Schwerpunkt der CO₂-Assimilation hingegen bedeutet eine langfristige Bindung von Nutzflächen, wobei nennenswerte Fixierungseffekte erst nach Jahren oder Jahrzehnten zu erwarten sind. Die langfristige Fixierung des gebundenen Kohlendioxids im Holz bedeutet, dass geschlagenes Holz nicht als Brenn- sondern ausschließlich als Baumaterial und als Ausgangsrohstoff in einem geschlossenen (Wieder)-Verwendungsprozess genutzt werden darf: Auch nach seiner Verbauung/Verwendung darf keine Verbrennung des kohlenstoffhaltigen Materials stattfinden, damit der gebundene Kohlenstoff nicht mehr als Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangt. Wirtschaftlich sinnvoll hingegen ist die chemische Aufbereitung des Kohlenstoffs.

Es sind industrielle und wirtschaftliche Konzepte zur Nutzung des gebundenen Kohlenstoffs zu entwickeln. Im Vordergrund steht dabei die Weiterverarbeitung des Kohlenstoffs in Kombination mit Silizium zu höherwertigen Produkten, jedoch ausschließlich durch den Einsatz regenerativer Energien. Diese Produkte sollen Stoffe ersetzen, die heute mit erheblichem Energieaufwand hergestellt werden – etwa Aluminium oder Stahl. Viele dieser Stoffe auf Kohlenstoffbasis sind heute bereits erforscht und werden zusammen mit Silizium als Metallsatz verwendet (z.B. Kohlefaserverbundwerkstoffe). Lieferant des Kohlenstoffs, der aus ausschließlich dem natürlichen Kreislauf entnommen wird, wäre die Forstwirtschaft oder möglicherweise die Kohlenstoffrückgewinnung aus synthetischen Maßnahmen (s.o.). Das Silizium als zweite Komponente ist das am weitest verbreitete Element und steht leicht abbaubar zur Verfügung (z.B. Sand). Die Ausbeutung der Kohlelagerstätten zur Gewinnung von Kohle ist aufgrund des hohen Energieaufwands und der Möglichkeit der Verbrennung zu CO₂ nicht diskutabel. Damit kommt der nachhaltigen Forstwirtschaft eine Schlüsselrolle zu – sowohl im Artenschutz, in der CO₂-Fixierung als auch als Lieferant für die Silizium/Karbonindustrie.



Anhang

Eigenschaften von CO₂

Kohlendioxid (CO₂) ist ein geruchsloses ungiftiges Gas, das jedoch bei einem Anteil von mehr als ... % in der Atemluft zum Erstickungstod führt (angewendet in Schlachthöfen).

Kohlendioxid ist unter Normalbedingungen ein sehr stabiles und linear aufgebautes Molekül: Ein zentrales Kohlenstoffatom ist von zwei einander gegenüberliegenden Sauerstoffatomen umschlossen. Aufgrund der höheren Elektronegativität des Sauerstoffs sind die Enden des Kohlendioxids mit einer negativen Partialladung versehen. Aufgrund dieser Ladungsverteilung kann das Molekül mit elektromagnetischen Feldern interagieren:

Mikrowellen lassen das Molekül rotieren

Wärmestrahlung ... -> Treibhauseffekt

Im Sichtbaren Licht werden die Sauerstoffatome längs ihrer Bindungsachse zu Schwingungen angeregt

UV-Licht kann ein Sauerstoffmolekül abspalten

Weitere charakteristische Eigenschaften sind die druckabhängigen Siede- und Schmelzpunktverläufe.

CO₂ reagiert nur begrenzt mit anderen Stoffen. Bekannt sind u.a.

1. Eine geringe Löslichkeit von CO₂ in Wasser unter Bildung von Kohlensäure (H₂CO₃)
2. Die Reaktionen mit molekularem Wasserstoff mit Bildung von Methan (CH₄) oder Kohlenmonoxid (CO)
3. Der Kalk-CO₂-Kreislauf (- CaO – Ca(OH)₂ – CaCO₃ -)
4. Aufspaltung von Sauerstoff und Kohlenstoff bei der Photosynthese [CO₂FIX]
5. Bildung von Hydraten bei hohem hydrostatischem Druck

Möglichkeiten der synthetischer CO₂-Assimilation

1. Lösung von CO₂ in Wasser

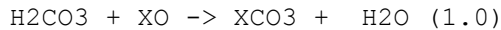
Nach der chemischen Gleichgewichtsreaktion $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ löst sich Kohlendioxid in Wasser und es entsteht Kohlensäure. Das Reaktionsgleichgewicht befindet sich allerdings sehr stark auf der linken Seite; d.h. es wird nur sehr wenig CO₂, etwa 2%, in Wasser gelöst.

Um nennenswerte Mengen CO₂ zu binden, sind daher erhebliche Mengen an Wasser erforderlich. Dies geschieht bereits mit dem in der Luft enthaltenen CO₂ und den Ozeanen. Die Folge ist eine Versäuerung der Meere, die wiederum Kalkschalen von Lebensformen zersetzen kann [13]. Andere Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass bereits ein Sättigungseffekt in den Ozeanen stattfindet; d.h. Die Meere sind immer weniger in der Lage, atmosphärisches CO₂ zu binden. Ein



anderes Problem besteht in einer eher geringen Umwandlung der Kohlensäure in ablagerungsfähige Feststoffe und auf natürlichem Wege sehr langsam sedimentfähige Substanzen entstehen, die gebundenen Kohlenstoff, z.B. in Form von Karbonaten, enthalten.

Das Karbonat-Anion der Kohlensäure könnte man nun über eine weitere Reaktion über ein Oxid binden, wobei ein Karbonat (oder Hydrogenkarbonat) entsteht und Wasser:



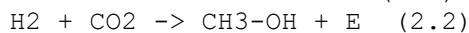
Diese Reaktion läuft in der Natur mit metallischem X sehr selten ab, da die Kohlensäure immer im gelösten Zustand mit Wasser vorkommt und das Metalloxid eher mit Wasser zu einer Base als mit der Kohlensäure reagiert ($\text{XO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{X(OH)}_2$). Die Reaktion (1) ist daher nur bei reiner Kohlensäure, heute eine chemische Kuriosität, effektiv. Weiterhin wird sich auch hier in einer Folgereaktion das freiwerdende Wasser mit dem Metalloxid ebenfalls zu einer Base wandeln. Zusätzlich könnte die Base mit dem X-Karbonat reagieren und das CO₂ wieder freisetzen! Die Reaktion (1) kann also nur dann ihren Zweck erfüllen, wenn man einen Stoff XO verwendet, der zwar mit Kohlensäure nach (1) reagiert; nicht jedoch mit Wasser – damit scheiden alle Metalle für X aus.

Es bietet sich also an, die Reaktion (1) mit einem wasserunlöslichen XO anzusetzen.

Die Bereitstellung eines Oxids XO erfordert allerdings i.a. Energie zur Gewinnung über den Ausgangsstoff X oder eine X-haltige Ausgangsverbindung.

2. Reaktionen mit molekularem Wasserstoff

Aus der Reaktion mit Wasserstoff anhand der Umwandlungen



entstünde in 2.0 Kohlensäure und atomarer Kohlenstoff. Diese Reaktion ist jedoch in dieser Form nicht bekannt. Geläufiger ist die Reaktion 2.1, in der aus Wasserstoff und Kohlendioxid Kohlenmonoxid und Wasser entsteht.

Nach (2.2) ergibt die Reaktion von Kohlendioxid mit Wasserstoff Methanol und freiwerdende Energie (exothermer Reaktion). Dies ist die klassische Reaktion zur Herstellung von Methanol; allerdings bei hohen Drücken und Temperaturen. An entsprechenden Katalysatoren für eine Reaktion bei normalen Umgebungsbedingungen wird z.Z. intensiv geforscht. Den zur Umwandlung notwendigen Wasserstoff kann man aus der Elektrolyse von Wasser gewinnen, wobei die Energie z.B. über Sonnen- oder Windkraftanlagen bereitgestellt werden kann.

Das Methanol-Konzept ist in einer ähnlichen Form bereits als alternativer Kraftstoff für den Antrieb von Fahrzeugen diskutiert worden [14].

Für das Fixieren des Kohlenstoffs ist es hier jedoch erforderlich, dass das Reaktionsprodukt, sei es Methanol, Kohlensäure oder Kohlenmonoxid, in eine weitere, chemisch stabile Substanz, die zur Langzeitdeponierung geeignet ist, umgewandelt wird. Hierzu kann z.B. Methanol in Essigsäure umgewandelt werden; wobei deren Acetate auskristallisieren und eingelagert werden können. Allerdings sind die Salze i.a. wasserlöslich – eine eher ungünstige Eigenschaft für das Einlagern in Untertagestätten. Ebenso kann die Reaktion der Salze mit den umgebenden Stoffen ein Problem darstellen; insbesondere dann, wenn das gebundene Kohlendioxid durch Zersetzungsreaktionen



erneut freigesetzt wird.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Polymerisation von Methanol zu längeren Alkoholketten; wobei ab einer bestimmten Länge nicht wasserlösliche fettartige Feststoffe entstehen und der ursprünglich aus der Atmosphäre stammende Kohlenstoff in den Polymerketten gebunden ist. Bei der Polymerisation ist jedoch auch dabei zu achten, dass dieser Vorgang auf CO₂-neutraler Basis erfolgt.



Web-Referenzen

- [01] Verwundbare Korallenriffe, <http://www.scinexx.de/wissen-aktuell-8863-2008-09-24.html>
- [02] Abnahme CO₂-Aufnahmefähigkeit der Ozeane, <http://www.sciencedaily.com/releases/2009/12/091203141854.htm>
- [03] Klimawandel ab 2°C globaler Temperaturerhöhung nicht mehr kalkulierbar, http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/zwei_Grad_Celsius.htm
- [04] Überschreitung der Marke von 2°C globaler Temperaturanomalie, <http://www.3sat.de/page/?source=/nano/bstuecke/140390/index.html>
- [05] Deckung des Energiebedarfs ohne Atomstrom, http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/greenpeace_atomkraft_und_klimaschutz.pdf
- [06] Verringerung des CO₂-Ausstoßes durch die globale Wirtschaftskrise, http://www.iea.org/press/pressdetail.asp?PRESS_REL_ID=290
- [07] Verweildauer des Kohlendioxids in der Atmosphäre, <http://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas>
- [08] Verlauf CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Verlauf_Kohlendioxidgehalt.png&filetimestamp=20100106154354
- [09] Caseine und andere biologisch abbaubare Kunststoffe, http://www.k-online.de/cipp/md_k/custom/pub/content_lang.1/oid,19108/ticket.g_u_e_s_t/local_lang.1/~Nachwachsende_Rohstoffe_und_Kunststoffe_aus_nachwachsenden_Rohstoffen.html
- [10] CO₂-Assimilationsprozesse u.a. von Bakterien, <http://dr-wachter.de/Skripte/Chemosynthese.pdf>
- [11] Künstliche Fixierung und Assimilation von CO₂, <http://www.tt.fh-koeln.de/publications/bra0499.pdf>
- [12] Desertec-Projekt, <http://www.desertec.org>
- [13] Versäuerung der Meere, http://de.wikipedia.org/wiki/Versauerung_der_Meere
- [14] Biologisch erzeugter Methanol als Benzin/Diesel-Ersatz, http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th1998/th1998_02_12.pdf
- [15] Assimilationsfähigkeit von Ozeanen, <http://de.wikipedia.org/Kohlendioxidfixierung>