

Detlev Möller

Das SONNE-Konzept: Die Kohlendioxid-Wirtschaft

Es wird ein Konzept zur schrittweisen, integralen und nachhaltigen Lösung der Energiebereitstellung und -speicherung auf der Basis einer Kohlendioxid-Wirtschaft bei gleichzeitiger Lösung des durch Kohlendioxid (CO₂) verursachten Klimaproblems vorgestellt. Dieses Konzept SONNE (SOLarbasierter KohleNstoff-Kreislauf und Nachhaltige Stoff-Energie-Wirtschaft) beinhaltet eine globale CO₂-Kreislauflführung oder – allgemein ausgedrückt – die Schaffung eines anthropogenen Kohlenstoffkreislaufes. Das Ziel ist also nicht die Entkopplung der Energieversorgung von Kohlenstoffträgern („CO₂-freie Welt“) sondern die gezielte Nutzung von Kohlenstoffverbindungen als Energiespeicher und -träger bei gleichzeitiger CO₂-Stationarität, d.h. CO₂-Freisetzung = CO₂-Abtrennung.

1. Einführung

Unsere zentrale Fragestellung lautet: Ist ein global geschlossener, anthropogener Kohlenstoffkreislauf ausschließlich unter Nutzung solarer Energie machbar, um damit

- einen weiteren Anstieg des Treibhausgases Kohlendioxids (CO₂) in der Atmosphäre zu verhindern und zu einer globalen Kohlenstoff-Nullbilanz zu gelangen,
- das Problem „Chemischer Energiespeicher“ auf der Basis von universell verwendbaren Kohlenstoffträgern zu lösen und
- gleichzeitig die auf der Basis fossiler Energieträger vorhandene Infrastruktur und technischen Lösungen nachhaltig weiter nutzen zu können?

Das hier vorgestellte SONNE-Konzept beruht auf folgenden Paradigmen (genauer: einem noch durchzuführenden und zu akzeptierenden Paradigmenwechsel):

- Es gibt keine „erneuerbare“ Energie, sondern nur einen im zeitlichen Mittel weitgehend konstanten solaren Energiefluss auf die Erde, der um den Faktor 10³ bis 10⁴ höher ist als der gegenwärtige globale jährliche Energiebedarf der Menschheit – der auch limitiert, aber offenbar hinreichend groß ist);
- es steht zukünftig ausreichend direkte solare (und sekundäre elektrische) Energie zur Verfügung, um bisher uneffektive chemische Prozesse durchzuführen (d.h. der Begriff „Energieeffizienz“ bekommt eine nachrangige Bedeutung) und
- das einzige Kriterium nachhaltigen Wirtschaftens ist die stoffliche Kreislauflführung (Nullbilanz).

Das Projekt SONNE geht von einer zukünftig weitgehenden Abtrennung des CO₂ aus Rauch- und Prozessgasen (*carbon capture*) aus, wobei es nicht zu einer Sequestrierung, sondern ‚nur‘ zu einer

Zwischenspeicherung kommen darf mit der Absicht, das abgetrennte CO₂ als Wertstoff in einen Kreislauf unter stofflicher *und* energetischer Nutzung zurückzuführen. Wir wollen daher die CCS-Technologie (s.w.u.) in eine CCC-Technologie (*carbon capture and cycling*) umwandeln (Abbildung 1).

Es ist unbestritten, dass ein Privileg, weitgehend *unbegrenzt* stofflich fixierte Energie ohne CO₂-Problem nutzen zu können, nur mit hohem energetischem Primäraufwand realisiert werden kann. Diese Energie steht aber ausreichend als Solarstrahlung zur Verfügung. Wir benötigen deshalb ein neues ökonomisches Denken (Paradigmenwechsel), das nicht mehr nur von einer spezifischen Energiebilanz sondern von einer globalen „ökologischen Bilanz“ ausgehen muss. Nicht dauerhaftes Wachstum führt zur Lösung gesellschaftlicher Probleme, sondern das Erreichen von stationären Zuständen (auf von der Gesellschaft zu definierenden Niveaus). Entscheidend ist das Erreichen einer stofflichen Nullbilanz, d.h. eine technische (künstliche) Nachahmung biogeochemischer Stoffkreisläufe bzw. die Integration des Menschen (im Sinne des Anthropocene) in einen *noobiogeochemischen* Kreislauf (Noosphäre = Anthroposphäre).

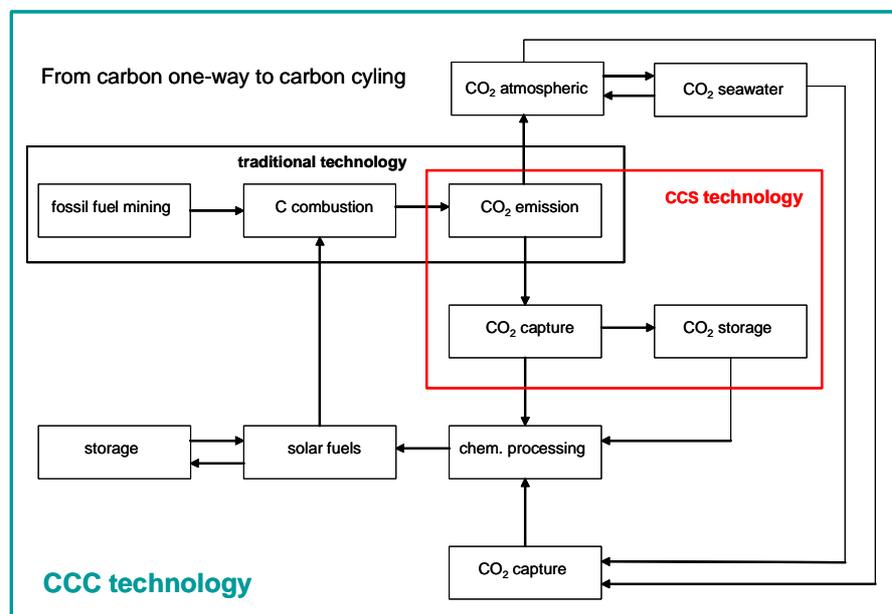


Abb. 1: Schema zum Konzept SONNE

Eine nachhaltige Lösung kann daher nur in einer globalen Kreislaufwirtschaft liegen, die in ein Gleichgewicht münden muss. Wachstum darf nur bis zu einem (neuen) Gleichgewichtszustand erfolgen; der Naturhaushalt (die globale Ökologie) verbleibt im Gleichgewicht, solange sich Konzentrationen in den natürlichen Reservoiren nicht ändern. Mit dem Konzept SONNE (globale CO₂-Wirtschaft) kann die Menschheit sich diesem *nachhaltigen* Ziel nähern und dieses sogar realisieren.

Stofflich stellt die Erde ein nahezu geschlossenes System dar. Die Biosphäre hat sich evolutionär in geschlossenen Stoffkreisläufen organisiert. Es bedarf keiner detaillierten Erläuterung, dass eine nachhaltige Noosphäre¹ auch nur innerhalb geschlossener Stoffkreisläufe langfristig bestehen

1 Die Noosphäre ist die sich mit der Biosphäre überlagernde menschliche Gesellschaft mit ihrem Lebensraum. Es wird auch der Begriff Anthroposphäre verwendet.

kann. Die bisherige und gegenwärtige Gesellschaft hat sich jedoch mit der ersten industriellen Revolution in eine globale stoffliche Einbahnstraße entwickelt – eine geochemische Umverteilung und Dissipation von Ressourcen. Die Kohlenstoffressourcen sind dafür das beste Beispiel. Über Jahrmillionen gebildet, werden sie innerhalb weniger hundert Jahre vollkommen in gasförmiges CO₂ umgewandelt und kein natürlicher Prozess ist abzusehen, der sie jemals wieder rückbilden würde. Kohlenstoff ist aber nicht nur Energieträger (global deckt er immer noch ca. 90 % des Energiebedarfs) sondern auch einzigartige Ressource einer Vielzahl von Materialien.

Wir gehen davon aus, dass sich als (solare) stoffliche Energieträger die bisher bekannten und genutzten Kohlenwasserstoffverbindungen (die jedoch bisher aus fossilen Ressourcen gewonnen wurden) unter Wahrung der genannten Nachhaltigkeitskriterien alternativlos anbieten. Diese, den fossilen Kohlenstoffträgern weitgehend ähnlichen, aber nunmehr als solare Rohstoffe (*solar fuels*) bezeichneten Energieträger könnten die Basis für die unbegrenzte Weiternutzung der herkömmlichen Technologien (Kraftwerke, Heizwerke, Kraftfahrzeuge, Flugzeuge usw.) bilden. Der große Vorteil dieser Herangehensweise liegt darin, dass über 100 Jahre ingenieurtechnische Entwicklung und daraus entstandene, bereits weitgehend optimierte Technologien genutzt werden können und enorme Mittel nicht in aufwendige alternative technische Lösungen, sondern in nachhaltige technische Lösungen des Konzeptes SONNE fließen könnten.

Kohlenstoff ist das einzige Element, das komplexe Verbindungen und Materialien bildet und zugleich durch einfache gasförmige Verbindungen (im Wesentlichen Kohlendioxid und Methan in seinen beiden höchsten und niedrigsten Oxidationsstufen) sich in einem globalen dynamischen Kreislauf befindet². Das ‚einzig‘ Problem im vom Menschen gestörten Kohlenstoffkreislauf (Verbrennung fossiler Stoffe) ist die Akkumulation von CO₂ in natürlichen Reservoiren (Atmosphäre und Weltmeer), welches zu den bekannten Klimafolgen führt. Der Anstieg des atmosphärischen CO₂ ist durch die Begrenztheit natürlicher physikalisch-chemischer Entfernungsprozesse und der zusätzlichen natürlichen Assimilation (Photosynthese) bedingt, was zu einer atmosphärischen Verweilzeit des zusätzlichen ‚anthropogenen‘ CO₂ von etwa 1.000 Jahren führt. Die vom Menschen jährlich freigesetzte Menge an CO₂ (gegenwärtig ca. 10 Gt C) kann daher nicht zeitnah in den Kreislauf zurückgeführt werden. Etwa 50 % der anthropogen freigesetzten CO₂-Menge wird durch die Biosphäre aufgenommen; es spricht vieles dafür, dass sich dieses ‚Selbstreinigungspotential‘ zukünftig verringert. Der Klimawandel mit seinen prognostizierten Folgen stellt alle bisher aufgetretenen Umweltprobleme in den Schatten.

Die globale Gesellschaft steht in den nächsten 20-30 Jahren vor einem Paradigmenwechsel (dritte industrielle Revolution) bezüglich der Energieversorgung. Es geht darum, die Ära fossiler Rohstoffe zu beenden und den Übergang in das solare Zeitalter vorzubereiten. Die Motivation dazu entspringt jedoch nicht vorrangig der Begrenztheit fossiler Ressourcen, sondern in erster Linie der Kontrolle der globalen Erwärmung. Konkret bedeutet das eine drastische Reduzierung der CO₂-Emissionen (die Aufgabe der Eindämmung anderer anthropogener Treibhausgase, insbesondere Distickstoffmonoxid und Methan wird mit Sicherheit zu einem späteren Zeitpunkt, vielleicht in 50-100 Jahren, vorrangig werden). Eine Reduzierung der globalen CO₂-Emissionen (es geht nicht um einzelne nationale Lösungen, jedoch könnten diese als globale Pilotprojekte dienen) ist nicht mit end-of-pipe-Technologien zu lösen wie beispielsweise mit der CCS-Technik (*carbon capture and storage*). Ein Übergang zur solaren Energieversorgung muss gekoppelt werden mit (zumindest weitgehend) geschlossenen anthropogenen Stoffkreisläufen.

2 Alle Elemente bilden mit ihren Verbindungen globale Stoffkreisläufe, jedoch teilweise mit toxischen Verbindungen oder charakteristischen Zeitskalen über geologische Epochen (wie Silizium und alle Metalle). Sie eignen sich daher nicht für eine globale anthropogene Kreislaufführung.

Aus den hier skizzierten Zusammenhängen wird deutlich, dass im Solarzeitalter die Energieeffizienz keine oder eine untergeordnete Rolle spielen wird (die energetische Effizienz der globalen Photosynthese, bezogen auf die solare Einstrahlung, liegt bei lediglich 3 %), hingegen jedoch die Forderung nach einer stofflichen Nullbilanz – in die Umwelt abgegebene Stoffe müssen wieder extrahiert werden. Daher ist es naheliegend, bereits innerhalb technologischer Systeme sowohl minimale Emissionen als auch eine interne Rezyklierung anzustreben. Wegen des solaren ‚Energieüberschusses‘ können aber thermochemische und thermodynamische (d.h. energieaufwendige) Prozesse realisiert werden, die vollkommen neue Stoffwandlungen und Stofftrennungen ermöglichen, sich heute jedoch verbieten, solange Energie aus fossilen Rohstoffen bzw. nicht nachhaltigen Quellen bereitgestellt wird. Es muss weiterhin in das allgemeine Bewusstsein rücken, dass Energie sich nicht in einem Kreislauf („erneuerbare“ Energie) befindet, sondern nur in eine Richtung fließt, von der Sonne zur Erde, und hier (ob mit oder ohne Menschen) umgewandelt wird in letztlich nicht mehr nutzbare Abwärme, die in den Weltraum abgestrahlt wird. Alle bisherigen Umweltprobleme waren und sind aber *stofflicher* Natur, nämlich die Verschiebung (Störung) biogeochemischer Kreisläufe, von der lokalen bis zur globalen Ebene.

2. Das Energieproblem

Die Energieversorgung basiert auf drei Ressourcensäulen³, nämlich

- „erneuerbaren“ Energieformen (alle basierend auf Solarenergie: direkte Solarstrahlung, Wind, Wasser, Biomasse),
- geologisch-biochemisch gespeicherter Solarenergie (fossile Rohstoffe) sowie
- kernchemischen Energieformen (Geowärme, Fusions- und Fissionsenergie).

Tausende Jahre hat der Mensch Holz zum Heizen, Kochen und Bauen verwendet. Abgesehen von lokalen Problemen (Ruß und Rauch) war es eine perfekte Lösung – „erneuerbar“ und CO₂-neutral. Wind- und Wasserkraft ergänzten den lokalen Energiebedarf. Der Hauptanteil an Prozessenergie stellte jedoch menschliche und tierische Muskelkraft dar. Für metallurgische Prozesse war die erreichbare Verbrennungstemperatur für Holz jedoch nicht hoch genug; deshalb wurde bereits vor 2.000 Jahren Kohle genutzt. Holzknappheit war (und ist) jedoch stets ein spezifisch regionales Problem gewesen; dazu entstand dann im frühen 19. Jahrhundert eine europäische Holzknappheit. Erst technische Innovationen, wie Dampfmaschine und Dynamo, führten in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zum exponentiellen Anstieg des Kohleverbrauchs. Eine weitere Innovation, der Verbrennungsmotor, brachte zwei weitere fossile Energieträger (gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe) in den letzten 100 Jahren, insbesondere nach 1960, neben der Kohle zu dominanten Ressourcen.

Seit Beginn der industriellen Revolution haben fossile Rohstoffe (Kohle, Öl und Gas) einen an der globalen Energieversorgung nahezu gleichbleibenden Anteil von ca. 90 %. Die Verbrennung von Kohle war während der vergangenen 1.000 Jahre die Hauptursache der zunächst lokalen und seit den 1950er Jahren zunehmend regionalen und globalen Luftverschmutzung. Die in diesem Zusammenhang zu nennenden lokalen und regionalen Luftqualitätsprobleme (Staub-, Schwefel- sowie Stickoxidbelastung und das wohl bemerkenswerteste daraus folgende Umweltproblem, der saure Regen) können heute durch eingeführte end-of-pipe-Reinigungstechnologien (Entstaubung, DeNO_x, Entschwefelung) als prinzipiell gelöst betrachtet werden. Einziges verbleibendes – und

3 Der Vollständigkeit halber sei eine vierte Energiequelle genannt, die auf der Gravitationsenergie beruht (z.B. Gezeitenenergie).

anscheinend unlösbares – Problem ist die Emission von Kohlendioxid (CO₂) und die daraus folgende Erhöhung des anthropogenen Treibhauseffektes⁴.

Die Möglichkeiten der alternativen Nutzung „erneuerbarer“ Energieformen (Wind, Wasser, Biomasse) soll hier als hinreichend bekannt vorausgesetzt werden. Es versteht sich ebenfalls von selbst, dass diese Energieformen einen wichtigen, aber mit großer Sicherheit immer klein bleibenden Anteil an der regionalen (geschweige denn globalen) Energieversorgung haben werden (siehe Abbildung 2). Insbesondere Sicherheitsaspekte lassen die Nutzung der Kernenergie auch nur als eine Übergangslösung erscheinen. Die in diesem Zusammenhang stehenden komplexen Probleme sollen hier nicht berührt werden, da auf eine andere Lösung gesetzt wird. Die langfristige Lösung des globalen Energieproblems kann daher nur in einer direkten Nutzung der Solarstrahlung erfolgen. Die wissenschaftlich-technischen Lösungen sind prinzipiell bekannt und bereits heute umsetzbar, so durch Umwandlung von direkter Solarstrahlung in Wärme oder elektrischen Strom. Die damit im Zusammenhang stehenden geopolitischen Aspekte sollen hier auch nicht weiter diskutiert werden. Es ist offensichtlich, dass *alle* Energiequellen einer geographisch heterogenen Verteilung unterliegen.

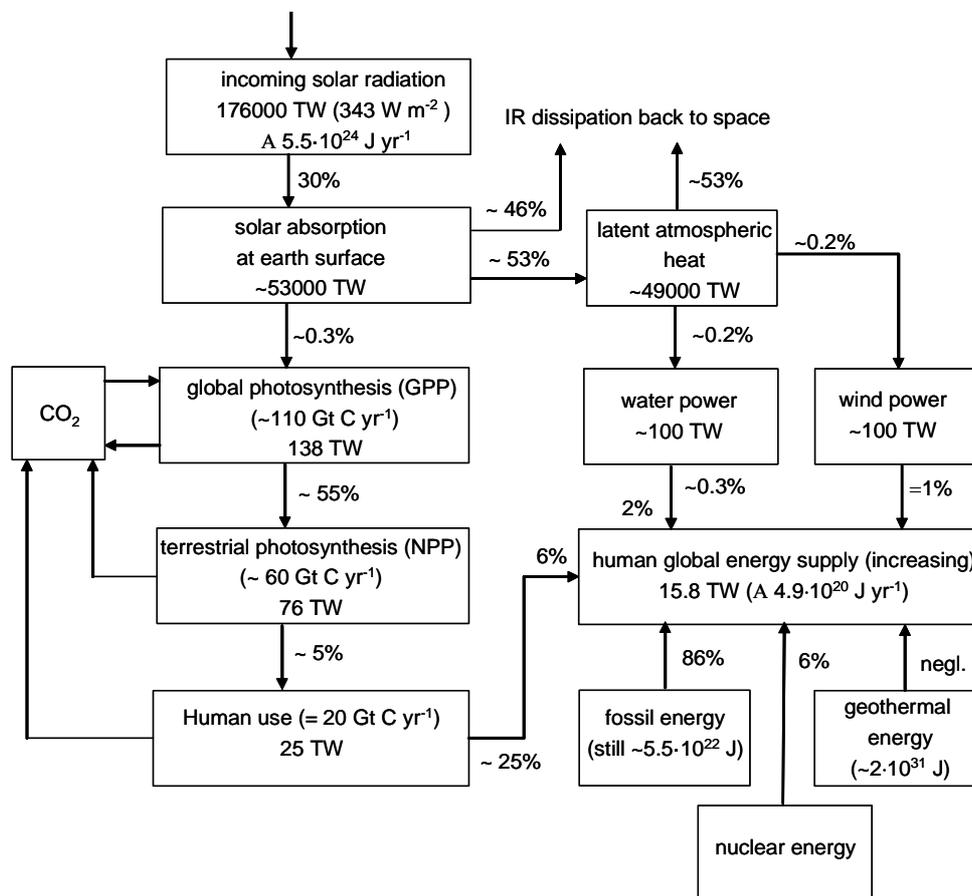


Abb. 2: Schema des solaren Energieflusses auf der Erde. Zu beachten ist, dass der Weltenergiebedarf oftmals in TWh (in 2006: 138.300) angegeben wird entsprechend TW pro Jahr (für 2006 also 15,8 TW). Nach Möller (2010)

4 Zum anthropogenen Treibhauseffekt tragen auch weitere emittierte Stoffe bei, die aber im Wesentlichen aus dem Bereich der Landwirtschaft stammen (CH₄, N₂O) und mit Sicherheit weitaus schwieriger zu kontrollieren sind als CO₂. Da anthropogen emittiertes CO₂ auch zu ca. 70 % zur atmosphärischen Erwärmung beiträgt, ist es deshalb folgerichtig hier eine Lösung zu suchen.

Das wesentliche Problem besteht jedoch in der Speicherung und dem Transport der Energie. Erst die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ, engl. HVDC – *High Voltage Direct Current*) ermöglicht Transportdistanzen bis zu 3.000 km mit akzeptablen Verlusten (ca. 10 %). Der in der Nähe der Verbraucher ankommende Strom, welcher nicht zeitgleich verbraucht werden kann, wird nach dem SONNE-Konzept in Kohlenstoffträger aus CO₂ umgewandelt. Es bietet sich aber auch eine Vor-Ort-Umwandlung der aus solarer Strahlung primär gewonnenen Energie (Wärme und Strom) in chemische Energie an. Das in den 1980er Jahren entwickelte Konzept der Wasserstofftechnologie dürfte (neben limitierenden technologischen Aspekten) allein wegen der Sicherheitsaspekte jedoch keine Zukunft mehr haben.

Es sei festgehalten, dass es kein ‚Energieproblem‘ gibt. Die noch vor 10 Jahren befürchtete peak-oil-Krise wird nicht weiter diskutiert; bislang wurden stets mehr Lagerstätten erkundet als aufgebraucht. Kohle reicht noch Jahrhunderte, und ‚unkonventionelle‘ Kohlenstoffvorräte sind wahrscheinlich noch um Größenordnungen höher. Gegenwärtig liegt der Weltenergieverbrauch bei 18 TW (2010) und wird sich bis 2050 wohl verdoppeln. Jede Prognose bleibt spekulativ, jedoch wird mit einem Stagnieren der Weltbevölkerung zwangsläufig auch eine Begrenzung (abgesehen von weiteren Veränderungen des spezifischen Energieverbrauchs) des Weltenergieverbrauchs eintreten, so dass der globale Bedarf nicht wesentlich 1/1.000 der solaren Absorption (siehe Abbildung 2) überschreiten wird. Welche möglichen Konsequenzen das jedoch – bei Existenz großer ‚Solarfarmen‘ in sonnenreichen Gegenden – auf das regionale Klima haben kann, bedarf eingehender Forschungen. Neben den spezifischen lokal und regional noch auszuschöpfenden Möglichkeiten an Windenergie und den noch weitgehend ungenutzten Möglichkeiten der stofflich-energetischen Abfall-Biomassenutzung wird sich die großtechnische Solarnutzung (*Desertec*-Konzept) durchsetzen (Photovoltaik in sonnenfernen Regionen wird mit Sicherheit einst als eine Übergangserscheinung charakterisiert werden bzw. spezifische Ausnahme bleiben). Für das hier entwickelte Konzept der CO₂-Wirtschaft ist es unerheblich, ob dabei Solarthermie oder Photovoltaik als Energiewandlungsprinzip zum Einsatz kommt (die Vorzüge der solarthermischen Kraftwerke sind hinreichend bekannt). Dabei können vor-Ort – neben der Umwandlung in elektrischen Strom – großen Mengen Wärme direkt prozesstechnisch genutzt werden. Abbildung 3 zeigt die Kopplung zwischen solarer Energie und CO₂-Wirtschaft, wobei die Prozesse räumlich entkoppelt sein können (*smart grid*); zentrale Einheiten werden Hybrid-Kraftwerke (Abbildung 4) bilden, die prinzipiell keine Nettostromerzeugung sondern einer Stromspeicherung über Kohlenstoffträger (vorzugsweise Gas) dienen.

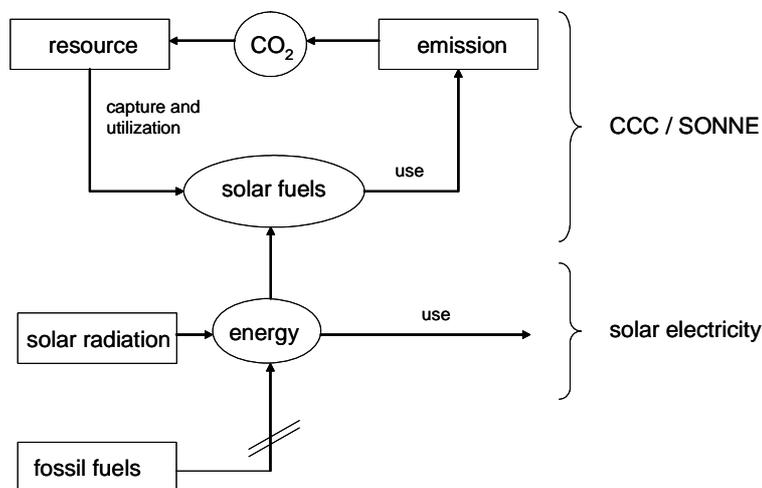


Abb. 3: Kopplung der solaren Energiebereitstellung mit der CO₂-Wirtschaft

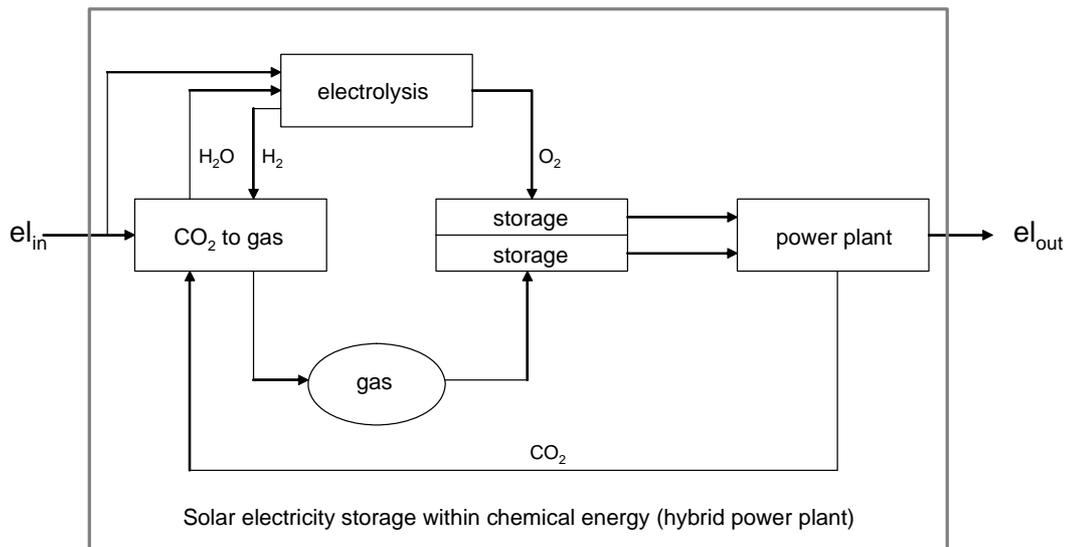


Abb. 4: Schema eines Hybrid-Kraftwerkes

3. Das CO₂-(oder Klima-)Problem

Es wird hier vorausgesetzt, daher nicht weiter erläutert, dass der globale Anstieg des CO₂ in der Atmosphäre erstens anthropogen verursacht ist und zweitens zu einer anthropogen verursachten globalen Erwärmung führt, wobei CO₂ daran einen Anteil von ca. 70 % hat. Drei Länder (China, Indien und die USA) planen die Errichtung von etwa 850 neuen kohlegefeuerten Kraftwerken bis 2020 mit einer erwarteten Emission von 2,7 Gt CO₂ (MIT 2009). China hatte im Jahr 2007 alleine 174 neue Kohlekraftwerke gebaut und trägt nunmehr zur Hälfte der globalen Kraftwerkskapazitäten bei (mit 1.300 GW). Die globale Kapazität an Kohlekraftwerken wird in den nächsten 10 Jahren um 35 % wachsen. Der Klimatologe Hans Joachim Schellnhuber meint, dass im Jahr 2050 die CO₂-Emission global um 80 % relativ zur Emission im Jahr 1990 reduziert werden muss, um dramatische Klimafolgen zu vermeiden. Das ist aus heutiger Sicht nur vorstellbar, wenn der globale Übergang in das solare Zeitalter ernsthaft innerhalb der nächsten Jahre begonnen wird (wir gehen von einer Übergangszeit von bis zu 50 Jahren aus) – eine wenig realistische Vorstellung. Ein weiterer Anstieg des atmosphärischen CO₂ erscheint daher als unvermeidbar (siehe Abbildung 6).

Bevor „erneuerbare“ Energieressourcen die zukünftige Energieversorgung dominieren, wird gegenwärtig die CCS-Technologie (*carbon capture and storage*) von vielen Seiten als einzige Zwischenlösung zum Eindämmen der Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂) fossilen Ursprungs betrachtet. Aber selbst wenn diese Technologie an allen stationären Großquellen angewandt wird, würden ca. 50 % (entspricht gegenwärtig 3 Gt C) der CO₂-Emission aus kleinen und mobilen Quellen weiterhin in die Atmosphäre abgegeben werden. Auch wenn eine zusätzliche CO₂-Aufnahme durch die Weltmeere von ca. 2 Gt C a⁻¹ als ultimative Senke angesetzt wird, bliebe die globale CO₂-Emission immer noch zu hoch (abgesehen von dem wahrscheinlichen, zunächst weiteren Anstieg infolge genutzter fossiler Rohstoffe). Als ein weiteres zumindest potentielles Problem wird die geologische Speicherung von CO₂ angesehen. Und schließlich wird mit dieser end-of-pipe-Technologie nichts an der ‚Einbahnstraße‘ der Verwendung fossiler Kohlenstoffträger geändert. Irgendwann sind die Vorräte aufgebraucht.

Seit Beginn der industriellen Revolution wurden etwa 330 Gt CO₂-C (1 Gt = 10¹⁵ g) als Folge der Verbrennung fossiler Rohstoffe und der Zementproduktion (letztere hat einen Anteil von ca. 5 %) emittiert (Boden 2009). Dazu kommen weitere ca. 150 Gt CO₂-C als Folge des Landnutzungswechsels, hauptsächlich durch Entwaldung (Houghton 2005). Allein seit 1950 beträgt die gesamte anthropogene CO₂-Freisetzung etwa 350 Gt CO₂-C, also 73 % der gesamten ‚historischen‘ Freisetzung. Messungen und Evaluierungen des globalen Kohlenstoffbudgets haben jedoch ergeben, dass nur etwa die Hälfte dieser CO₂-Menge in der Atmosphäre verblieb (Prentice u.a. 2001). Der nicht in der Atmosphäre akkumulierte CO₂-Anteil muss also durch die Ozeane, die kontinentale Biosphäre oder in Kombination beider aufgenommen sein.

Die anthropogene CO₂-Emission steigt seit dem Jahr 2000 viermal schneller als in der vorangegangenen Dekade, ungeachtet bereits getroffener Abmachungen zur CO₂-Begrenzung (Kyoto-Protokoll). Im Jahr 2007 erreichte die gesamte Emission (einschließlich der Landnutzungsänderung) 10 Gt CO₂-C. Die Kapazität natürlicher CO₂-Senken steigt noch an, aber langsamer als der Anstieg des anthropogenen CO₂, der seit 2000 pro Jahr 2 ppm ausmacht und damit 33 % höher ist als in der davor liegenden 20 Jahren (Abbildung 5). Natürliche CO₂-Senken entfernten jährlich 54 % (4,8 Gt CO₂-C) der anthropogenen CO₂-Emission im Zeitraum 2000-2007 und werden nun weniger effizient (ozeanische Sättigung). Endgültige Senke atmosphärischen CO₂ ist die Aufnahme durch den Ozean und das Vermischen des Oberflächen- mit dem Tiefenwasser (charakteristische Zeit von vielen Tausend Jahren). Der inzwischen nachgewiesene Anstieg des ozeanischen Karbonats, verbunden mit einer Versäuerung hat wahrscheinlich weitreichende Folgen für unser Klimasystem, die neben dem global warming von nicht minder großer Bedeutung sind.

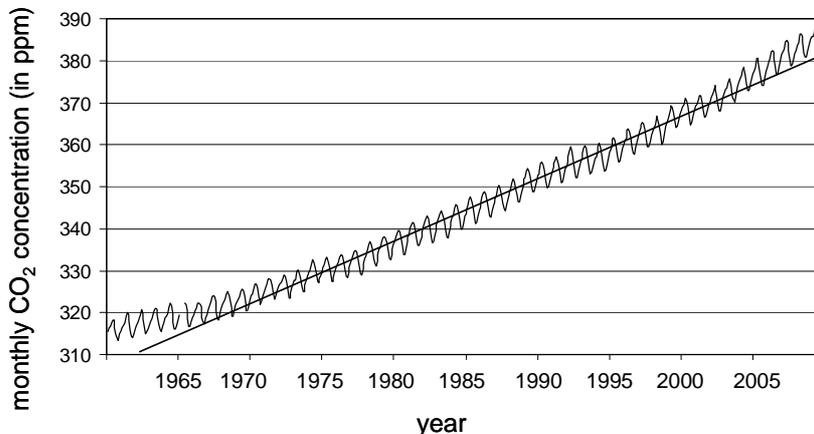


Abb. 5: Die Keeling-Kurve: 1959-2008. CO₂-Messreihe auf Mauna-Loa (Hawaii). Monatsmittelwerte (in ppm) aus in-situ-Messungen (R. F. Keeling, S. C. Piper, A. F. Bollenbacher und S. J. Walker: Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography (SIO), University of California, La Jolla, California USA 92093-0444). Die Linie stellt eine lineare Regression der Messwerte zwischen 1970 und 2000 dar.

Die vorindustrielle atmosphärische CO₂-Konzentration wird auf der Basis von Eiskerndaten mit 275-280 ppm angegeben (IPCC 2007), wahrscheinlicher ist jedoch ein Wert um 300 ppm (Möller, unpubl.), der bis 1910 kaum überschritten wurde. Die frühestens zuverlässigen CO₂-Messungen können der Mauna-Loa-Messreihe entnommen werden (1959 ca. 316 ppm, siehe Abbildung 5); im Jahr 2010 betrug die mittlere CO₂-Konzentration 388 ppm. In den ersten 60 Jahren des 20. Jahrhunderts stieg die atmosphärische CO₂-Konzentration also lediglich um 16 ppm, während sie in den nachfolgenden 60 Jahren um 73 ppm anstieg. In Abbildung 5 ist zu ersehen, dass in der ers-

ten Periode (vor 1970) der CO₂-Anstieg wesentlich kleiner war (ca. 0,8 ppm a⁻¹) als zwischen 1970 und 2000 (linearer Anstieg mit ca. 1,4 ppm a⁻¹), während nach 2000 ein Anstieg auf 2 ppm a⁻¹ beobachtet wird. Im Vergleich dazu seien die kumulativen CO₂-Emissionen angeführt (Daten nach Boden 2009): 1900-1960 ca. 70 Gt CO₂-C und 1960-2010 ca. 290 Gt CO₂-C (die gesamte Emission vor 1900 wird mit ca. 12 Gt CO₂-C angegeben). Die momentane Entwicklung zeigt eine Beschleunigung der anthropogenen CO₂-Freisetzung (die Ursachen wurden zu Beginn von Abschnitt 2 genannt); die in Abbildung 6 vorgestellte Prognose eines Anstiegs (3 % Wachstum der jährlichen Emission) des atmosphärischen CO₂ um weitere 160 ppm (auf etwa 550 ppm im Jahr 2050) erscheint nicht unwahrscheinlich. Neben der Einführung von CCS als einzige end-of-pipe-Technologie zur CO₂-Reduzierung (was aber lediglich zu einer Dämmung des CO₂-Anstiegs führen kann) kann *nur* die Energiewende nachhaltig das CO₂-Problem lösen.

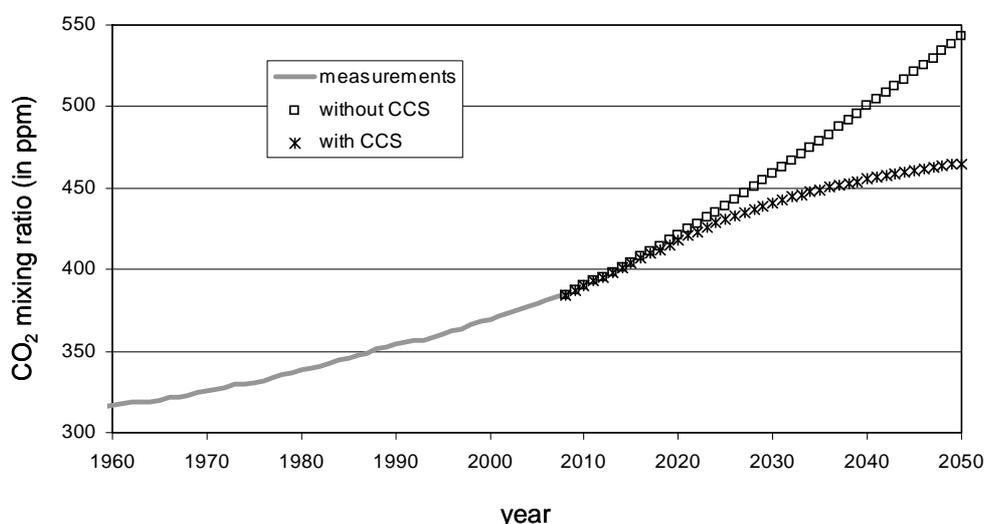


Abb. 6: Zwei Szenarios der möglichen weiteren Entwicklung der atmosphärischen CO₂-Konzentration (nach Möller 2010). Messungen: Daten von Mauna Loa (siehe Abbildung 5)

4. Chemische Nutzung von CO₂

Das CO₂-Molekül ist chemisch äußerst stabil; nur in der Hochatmosphäre kann es photochemisch gespalten werden ($\lambda < 230$ nm). Eine direkte CO₂-Thermolyse erfordert > 1.500 °K. Die weitgehend oxidativen Eigenschaften der natürlichen Umwelt hätten längst alle reduzierten Kohlenstoffverbindungen (im wesentlichen CH₄ und Kohlenwasserstoffe) im Verlaufe der Erdevolution zum CO₂ oxidiert, wären nicht die Pflanzen, die CO₂ photosynthetisch assimilieren und somit den ‚ewigen‘ Kohlenstoff-Kreislauf (Reduktion und Oxidation) aufrecht erhalten. Sie machen es – aus reaktionschemischer Sicht – wenig effektiv, d.h. mit einer geringen Lichtausbeute (ca. 3 % der Solarstrahlung) und einem geringen spezifischen Nettoumsatz (einige g C m⁻²d⁻¹) aber dafür über große Flächen der Erde verteilt und somit dennoch in Mengen jenseits menschlicher Umsätze (~ 210 Gt C a⁻¹). Eine chemische Reduktion des CO₂-Moleküls erfordert entweder eine sehr große spezifische Energiezufuhr oder eine entsprechende katalytische Aktivierung. Zunächst ist es möglich, aus CO₂ alle C1-Moleküle herzustellen, die sowohl als Energieträger (direkt als Brennstoff in Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen oder indirekt als H₂-Lieferant) als auch Synthesebaustein für weitere organische Verbindungen in Betracht kommen: CO (Kohlenmonoxid), CH₄

(Methan), HCHO (Formaldehyd), CH₃OH (Methanol), HCOOH (Ameisensäure). Intensiv wird, teilweise seit 2-3 Jahrzehnten, an folgenden prinzipiellen Verfahren gearbeitet, wobei folgende Einschätzungen gegeben werden sollen⁵.

Direkte CO₂-Synthesen: CO₂ kann direkt zur Herstellung von Polycarbonaten und Karbamatn eingesetzt werden (weitere Synthesen sind denkbar), jedoch bleibt die mengenmäßige Anwendung in Bezug auf eine CO₂-Wirtschaft vollkommen vernachlässigbar.

Dry Reforming (CO₂ + CH₄ → 2 CO + 2 H₂) stellt in Verbindung mit Biomethan⁶ (aber auch Erdgas) einen wichtigen Weg zur Synthesegas-Herstellung (nachfolgende Fischer-Tropsch-Synthese) dar (≥700 °C, Ni-Katalysator). Im Sinne der CO₂-Wirtschaft dürfte dieser Weg aber nur eine Übergangslösung – wenn überhaupt – bilden, da andere, direkte Reduktionswege des CO₂ zu bevorzugen sind.

Katalytische CO₂-Hydrierung: Zahlreiche katalytische Wege werden beschrieben, u.a. der RWGS-Prozess (*reverse water gas shift*) CO₂ + H₂ → CO + H₂O und das *steam reforming* (Cu-Katalysatoren) CO₂ + 3 H₂ → CH₃OH + H₂O und CO + 2 H₂ → CH₃OH sowie insbesondere die Methanisierung (*methanation*); da CO sehr reaktiv ist, reagiert es zumeist weiter zum CH₄: CO₂ + 4 H₂ → CH₄ + 2 H₂O. Dieser Prozess läuft mit 100% Selektivität bei relativ milden Bedingungen (50-200 °C) an verschiedenen Übergangsmetallkatalysatoren ab. Beim RWGS (400-600 °C an Fe-Katalysatoren) stellt die Methanisierung eine Parallelreaktion dar, wie das ebenfalls thermodynamisch favorisierte Boudouard-Gleichgewicht 2 CO ↔ CO₂ + C.

Hochtemperaturprozesse (solarthermische Reaktoren): Sogenannte Solartürme (*solar receiver*) stellen in sonnenreichen Gegenden eine interessante Möglichkeit der CO₂-Reduktion dar, wobei grundsätzlich von Metalloxid-Zyklen ausgegangen wird.



Photokatalyse und Elektrolyse in wässrigen und nichtwässrigen Lösungsmitteln: Geringe spezifische Ausbeuten (breites Produktspektrum); langsame Reaktionen und unverstandene Reaktionsmechanismen; Probleme mit der Stabilität des Katalysators, der Elektroden und/oder Membranen.

Künstliche Photosynthese: In Zusammenarbeit mit Biochemikern wird versucht, die Zellstruktur reaktortechnisch nachzuahmen und Enzymkatalysatoren anzuwenden. Große Fortschritte wurden erzielt, aber selbst bei einer eventuellen Überwindung der noch bestehenden Probleme (insbesondere der Katalysatorstabilität) erhebt sich die Frage, warum nicht bereits favorisierte Prozesse besser anzuwenden sind.

Festkörper-Hochtemperaturelektrolyse: Erst im Laborforschungsstadium ist die CO₂-Elektrolyse bei ca. 800 °C an Metalloxiden, ein Prozess, über den wenig in der Literatur bekannt ist und der

5 Basierend auf Ergebnissen der 11th International Conference on Carbon Dioxide Utilization, June 27-30, 2011, Dijon (France). Siehe auch: Aresta und Forti (1987), Edwards (1995), Aresta und Aresta (2003), Park u.a. (2004), Aresta (2010).

6 Eine Möglichkeit besteht auch in der Nutzung von (Abfall-)Biomasse, die in zahlreichen Prozessen ‚veredelt‘ werden kann; zweifellos stellt die Hydrierung zu Methan – energetisch gesehen – die effektivste Kohlenstoffnutzung dar.

chemisch eine Kombination der solarthermischen Reaktion mit einer Elektrolyse darstellt; er wird von Hansen (2011) als die absolut favorisierte Zukunftsversion angesehen.

Wir sehen, dass eine globale CO₂-Wirtschaft mit dem Hintergrund der Bereitstellung nicht nur von lediglich in der Größenordnung von jährlich 100 Mt Basischemikalien, sondern von jährlich einigen Gt solar fuels ausschließlich auf großtechnischen Chemieanlagen basieren kann, wobei die Wasserstoffbereitstellung eine Schlüsselrolle spielen wird (aus jetziger Sicht am effektivsten aus der Wasser-Elektrolyse).

Im Sinne einer globalen CO₂-Wirtschaft kann der Prozess wie folgt beschrieben werden:

Gewinnung von Nutzenergie (Strom und Wärme) aus Sonnenstrahlung →
Bereitstellung/Herstellung der Syntheseausgangsstoffe (CO₂ + H₂) →
Synthese von gasförmigem CH₄ und flüssigen Kohlenwasserstoffen (Karbonstoffe) →
Transport mit vorhandener Infrastruktur zum Anwender →
Verbrennung der Kohlenstoffe in herkömmlichen stationären und mobilen Anlagen →
Globale Verteilung der Verbrennungsprodukte (CO₂ und H₂O) → Wiedernutzung.

Die Menschheit hat in etwa 150 Jahren eine Infrastruktur aufgebaut und dazu weitgehend optimierte technologische Lösungen erarbeitet, die alle auf der Nutzung von fossilen Rohstoffen (Kohle, Gas, Öl und daraus gewonnene spezifische Treibstoffe und Polymermaterialien) beruhen. Auf feste Brennstoffe kann generell verzichtet werden, da gasförmige und flüssige über wesentlich bessere Nutzungseigenschaften verfügen (Energiedichte, Transport und Lagerung). Somit verbleiben zwei prinzipielle Stoffgruppen, welche allen gegenwärtigen und zukünftigen Nutzungsbedingungen gerecht werden:

- gasförmige Kohlenwasserstoffe (C_nH_{2n+2} mit n < 6; Methan, CH₄ als Leitsubstanz),
- flüssige Kohlenwasserstoffe (z.B. Alkane C_nH_{2n+2} mit n > 6).

Die Nutzung aller dieser Verbindungen erfolgt in verfügbaren hochentwickelten Verbrennungsanlagen (Motoren, Turbinen, Öfen), wobei sie in idealer Weise vollkommen zu CO₂ und H₂O umgesetzt werden:



Eine nachhaltige Lösung kann also nur darin bestehen, eine Technologie zu ermöglichen, die erforderlichen Kohlenwasserstoffe (bzw. allgemein organischen Kohlenstoffträger) aus dem CO₂ (der Luft und/oder Abgase) zu gewinnen und damit einen global geschlossenen Kreislauf zu erreichen (siehe Abschnitt 5 und Abbildung 7).

Es ist zu erkennen, dass wasserstofffreie Kohlenstoffträger (CO und C) insbesondere in Anwendung der oxyfuel-Technik den unschätzbaren Vorteil haben, erstens in einem kleineren stöchiometrischen Verhältnis zum O₂ (mit anderen Worten, es wird weniger reiner Sauerstoff benötigt) zu stehen und zweitens ‚reines‘ CO₂ als Abgas zu liefern:





Für Langzeit-Weltraummissionen wurden derartige Reaktionszyklen zur Produktion von Sauerstoff und zum Verbrauch von Kohlendioxid betrachtet. Die Methan-Pyrolyse rezykliert Wasserstoff



Aber interessanter wäre die Bildung elementaren Kohlenstoffs gemäß der Bruttoreaktion



Derartige Hochtemperaturprozesse (auch als Elektrolysen) wären vorteilhaft an solaren Standorten durchzuführen; als generelle Budgetgleichung gilt



welche umgekehrt solar fuels wieder in CO_2 und H_2O unter Energiefreisetzung verwandelt.

Sowohl vom Methan (CH_4), dem Methanol (CH_3OH) als auch dem Synthesegas ($\text{CO} + \text{H}_2$) lassen sich die gesamte organische Synthesechemie ableiten sowie ‚künstliche‘ Treibstoffe gewinnen. Das CO/H_2 -Gas (auch Wassergas genannt) kann abhängig vom $\text{CO}:\text{H}_2$ -Verhältnis in Alkane, Alkene und Alkohole umgewandelt werden (Fischer-Tropsch Synthese). Mit CO (das altbekannte Stadtgas) wie auch CH_4 (Erdgas) stehen gasförmige Energieträger zu Verfügung, die in der bestehenden Infrastruktur eingesetzt werden können. Die Möglichkeit der Kokserzeugung garantiert die weitere Anwendung klassischer metallurgischer Prozesse. Darüber hinaus kann langfristig fester Kohlenstoff anstelle gasförmigen CO_2 sequestriert werden im Sinne einer Klimasanierung, d.h. Erzielung einer negativen CO_2 -Bilanz.

Zweifellos bedeutet ‚Solarzeitalter‘ jedoch prioritäre Nutzung elektrischer Energie zur Netzwerkmobilität, lokalen individuellen Mobilität, zum Wärmen, Heizen und Kochen (ggf. über neuartige Wärmespeicher). CO_2 -Nutzung bedeutet einen erheblichen Verlust an solarer Energie. Eine CO_2 -Wirtschaft soll folglich nur zwei Kriterien erfüllen:

- Speicherung solarer und daraus abgeleiteter elektrischer Energie (Rückwandlung in Gaskraftwerken in Elektrizität on-demand),
- Bereitstellung von Kohlenstoffmaterialien als spezifische Energieträger und Materialien als Ersatz fossiler Materialien.

In allen CO_2 -Nutzungsreaktionen wird Wasserstoff benötigt, der zweckmäßig aus der Wasserelektrolyse (basierend auf ‚Solarstrom‘) gewonnen wird. Das oft gebrauchte Argument, der gewonnene Wasserstoff kann unmittelbar als Energieträger verwendet werden, ist mit der CO_2 -Wirtschaft nicht vereinbar (abgesehen von dem großen Nachteil der geringen Energiespeicherdichte von H_2 und den großen Vorteilen der breiten Palette an Kohlenstoffträgern). Der bei der Wasserelektrolyse gewonnene ‚Überschuss‘-Sauerstoff kann (wenn der Prozess der CO_2 -Umwandlung nahe späterer Hybrid-Kraftwerke erfolgt, siehe Abbildung 4) direkt im Oxyfuel-Prozess verwendet werden, um ‚reines‘ CO_2 für eine Rezyklierung zu erhalten.

In Kleinanlagen und mobilen Verbrennungsanlagen werden die solar fuels hingegen als CO₂ in die Atmosphäre zurückgeführt, um an anderer Stelle wieder aus der Atmosphäre extrahiert zu werden (Abbildung 8, siehe auch Abschnitt 5).

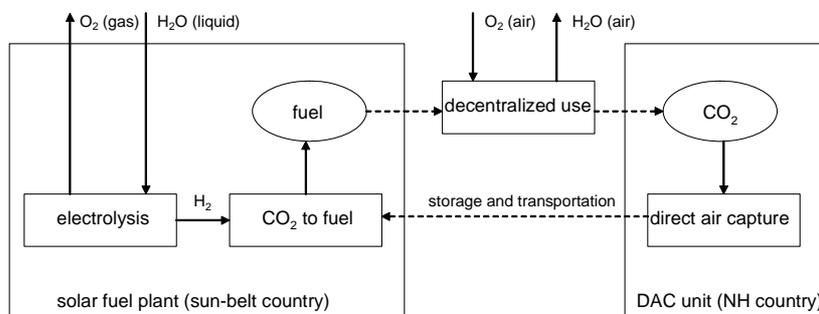


Abb. 8: Dezentrale Nutzung von solar fuels mit CO₂-Extraktion aus atmosphärischer Luft (DAC) in speziellen Anlagen.

5. Direct Air Capture: Der CO₂-Kreislauf

Die globale CO₂-Wirtschaft beinhaltet nicht nur eine weitgehend interne Rezyklierung von CO₂ (CCC – *capture and cycling* einschließlich dynamischer CO₂-Speicherung) sondern auch Abtrennung emittierten CO₂ aus natürlichen Reservoirs (*ambient capture*), vorzugsweise der Atmosphäre, weil CO₂-Emissionen in diesem Konzept nicht vermieden werden können⁷. Erst mit DAC (*direct air capture*) wird der CO₂-Kreislauf geschlossen (Abbildung 8) und eröffnet sich darüber hinaus eine Klimasanierung durch langfristige Kohlenstoff-Sequestrierung (selbstverständlich nicht als CO₂ sondern in geologisch stabilen Formen, wie elementarem Kohlenstoff, siehe Abbildung 1).

Die Idee der CO₂-Extraktion aus atmosphärischer Luft ist inzwischen weitgehend akzeptiert (jedoch hinsichtlich einer mengenmäßigen Bedeutung in weiter Ferne) und wird bereits in globalen ökologischen (z.B. Cao und Caldeira 2010) und ökonomischen z.B. Edenhofer et al. 2006) Modellen betrachtet. Ein großskaliges CO₂-Extrahieren wurde erstmals von Lackner u.a. (1999) vorgeschlagen. Zeman und Lackner (2004) schreiben: „It is not economically possible to perform significant amount of work in air, which means one cannot heat or cool it, compress it or expand it. It would be possible to move the air mechanically but only at speeds that are easily achieved by natural flows as well. Thus, one is virtually forced into considering physical or chemical adsorption from natural airflow passing over some recyclable sorbent“.

Generell ist es eine enorme Herausforderung, CO₂ aus der Luft in Größenordnungen bis zu einigen Gt C a⁻¹ zu entfernen. Gegenwärtig stammen etwa 50 % (etwa 4 Gt C a⁻¹) der globalen CO₂-Emission von kleinen und mobilen Quellen – ein wahrscheinlich noch ansteigender Anteil. Zusätzlich kommen 2 Gt C a⁻¹ aus der Landnutzungsänderung, eine Quelle, die in Zukunft sicherlich eingedämmt werden kann. Für eine realistische Strategie wären 4-6 Gt C a⁻¹ CO₂-capture wesentlich zu hoch – in erster Linie müssen daher Konvertierungsmaßnahmen (CO₂-freie Prozesse) soweit als möglich prioritär stehen.

7 Das würde das Ziel einer CO₂-freien Welt bedingen, ausschließlich basierend auf der Nutzung von Biomasse-Kohlenstoff.

Nahezu alle auf dem Gebiet DAC arbeitenden Wissenschaftler schlagen Absorptions-Techniken unter Nutzung von Natriumhydroxid (NaOH) unter Bildung von NaCO_3 vor, wobei dieses durch Kaustizierung, einem der ältesten chemischen Prozesse, wieder zum NaOH rückgebildet wird. Verschiedene Absorber wurden vorgeschlagen wie konvektive Türme (Lackner u.a. 1999), gepackte Kolonnen (Zeman 2007) und Sprühkolonnen (Stolaroff u.a. 2008).

In unserer Arbeitsgruppe wird eine andere Herangehensweise im Sinne der CO_2 -Entfernung aus der Atmosphäre durch ‚trockene Deposition‘ entwickelt, wobei verschieden große ‚Teiche‘ mit umweltverträglichen CO_2 -Absorptionslösungen gefüllt sind. Die Regeneration (CO_2 -Desorption) der Lösungsmittel erfolgt in speziellen Ultraschall-Desorbern bei mäßigen Temperaturen (60-80 °C) und wurde bereits erfolgreich getestet. Nehmen wir einen Oberflächenwiderstand von Null an, so wird der atmosphärische Transport nur durch den quasi-laminaren und atmosphärischen Widerstand bestimmt und ein Wert von 0,4-1,2 kg $\text{CO}_2\text{-C m}^2\text{d}^{-1}$ kann als „Trockendepositionsrate“ erwartet werden. Das entspricht einer Aufnahme von etwa 2.000 t C $\text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ – wenigstens um den Faktor 50 höher, als die besten Algen-Aquakulturen erreichen können. Eine Fläche (wir nehmen 50 % Auswascheffizienz an) von 10^4 km^2 – kleiner als die des Landes Brandenburg – ist nötig um 1-2 Gt $\text{CO}_2\text{-C}$ zu extrahieren. Das prozessierte Luftvolumen ist riesig (etwa 10^7 km^3 mit ca. 40 t $\text{CO}_2\text{-C km}^{-3}$), entspricht aber auch nur der Luftmenge, die durch etwa 100 große Kühltürme jährlich fließt. Somit ist also auch ein CO_2 -Auswaschen aus der Luft unter Nutzung (ehemaliger) Kühltürme denkbar.

Wegen der höheren Konzentration von gelöstem CO_2 (zu 90 % in Form von Hydrogenkarbonat) im Meerwasser (25 g C m^{-3}) stellt dieses im Vergleich zur Luft (in bodennaher Luft sind ca. $0,18 \text{ g C m}^{-3}$ enthalten entsprechend dem Mischungsverhältnis von 380 ppm) ein möglicherweise bevorzugtes Reservoir dar, wenn über eine geeignete Desorptionstechnologie verfügt werden kann (ultraschallinitiierte Desorption bei niedrigen Temperaturen). Um eine Zielgröße von 3 Gt C a^{-1} CO_2 -Extraktion zu erreichen, müssten ca. $10^5 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}$ Meerwasser prozessiert werden. Dieses Volumen entspricht ca. 0,01 % des Volumens des Weltmeeres und stellt somit extreme Anforderungen an technische Lösungen.

Für eine spätere CO_2 -Kreislaufführung ist eine dynamische CO_2 -Zwischenspeicherung (als Puffer zwischen capture und processing) notwendig, die zweifellos andere Randbedingungen aufweisen wird als die gegenwärtig im Rahmen von CCS beabsichtigte CO_2 -Speicherung über geologische Zeiträume. Jedoch muss auch untersucht werden, ob das in den nächsten Jahrzehnten in diesen Speichern verbrachte CO_2 später im Rahmen der CCC-Technologie wieder entnommen werden kann. Genau dieser Aspekt hat eine hohe umweltpolitische Bedeutung, könnte doch die unbedingt notwendige CCS-Technologie (als Initiator von CCC) eine erhöhte Akzeptanz erhalten.

6. Schlussfolgerungen

Primäre Quelle nutzbarer Energie soll ausschließlich solare Strahlung sein. (Solarstromkonzept, beispielsweise *desertec*), d.h. Solarthermie (mit anschließendem konventionellem Kraftwerk zur Stromerzeugung) und/oder Photovoltaik. Auch im Solarzeitalter blieben zunächst zwei Probleme, das der Energiespeicherung und das eines universell verwendbaren stofflichen Energieträgers. Dazu existieren bereits unterschiedliche Forschungsansätze; auf die wurde hier nicht eingegangen, da wir grundsätzlich die Basisstoffe der Kohle- und Petrolchemie – aber nun im Sinne von *solar fuels* – verwenden wollen. Neben Kohle haben sich gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe (*fossil fuels*) als optimale Träger von Energie und Materialien in der Geschichte der

Menschheit erwiesen. Darauf aufbauend, wurden seit über 100 Jahren eine globale Infrastruktur (Transportmittel, Speichermedien, chemische Industrie, Kraftwerke usw.) und verfahrens- und ingenieurtechnisch hervorragende Lösungen (Motore, Brenner, Antriebe usw.) entwickelt. Es wäre also von erheblichem strategischen Wert, diese Basis auf lange Zeit weiter zu nutzen und eine alternative Quelle für die erforderlichen Kohlenstoffträger zu suchen. Diese Quelle ist das natürliche (und von menschlichen Aktivitäten bereits erheblich angestiegene) CO₂-Reservoir. Entnahme (*capture*) von CO₂ aus allen Medien (Luft, Meereswasser, Rauchgas, Biogas usw.), die dynamische Zwischenspeicherung des CO₂, die Umsetzung des CO₂ zu Energieträgern und Materialien sowie die Rückführung der Kohlenstoffträger nach ihrer Nutzung in CO₂ sollen eine Adaption des natürlichen Kreislaufes Photosynthese-Atmung ergeben. Darüber hinaus kann durch *biogeoengineering* (ökologische CO₂-Sequestrierung, dauerhafte Kohlenstoffrückführung im Sinne einer Klimasanierung) eine Gegensteuerung zum Klimawandel erreicht und wertvolle Zeit (durch Klimastabilisierung) für den Energiestrukturtransfer gewonnen werden.

Zur Realisierung einer globalen CO₂-Wirtschaft (SONNE-Konzept) müssen bisher bekannte Lösungsvorschläge neu bewertet und neue Ideen entwickelt werden, die in einem in sich geschlossenen Konzept zur Lösung folgender Fragestellungen beitragen:

- Abtrennung bzw. Anreicherung von CO₂ aus natürlichen Reservoiren (Luft und Meereswasser) sowie die Speicherung von CO₂ (und dessen Umwandlungsprodukte) zum Zwecke der Klimastabilisierung und Wertstoffgewinnung;
- Chemische Umwandlung von CO₂ zu Materialien und Energieträgern;
- Auffinden intelligenter Lösungen zur Energiespeicherung;
- Begründung eines ökonomischen Paradigmenwechsels zu einer solarbasierten CO₂-Kreislaufwirtschaft sowie
- Quantifizierung von Rückkopplungseffekten im Klimasystem und Kohlenstoffkreislauf.

Literatur

- Aresta, M. und G. Forti, Hrsg. (1987): Carbon dioxide as a source of carbon: biochemical and chemical use. NATO ASI series. Series C, Mathematical and physical sciences No. 206. D. Reidel Pub. Co, Boston and Dordrecht, 441.
- Aresta, M. und M. E. Aresta, Hrsg. (2003): Carbon dioxide recovery and utilization. Springer-Verlag, Berlin, 384.
- Aresta, M., Hrsg. (2010): Carbon dioxide as chemical feedstock. Wiley-VCH, Weinheim, 394.
- Boden, T. A.; G. Marland und R. J. Andres (2009): Global, regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi: 10.3334/CDIAC/00001
- Cao, L. und K. Caldeira (2010): Atmospheric carbon dioxide removal: long-term consequences and commitment. Environmental Research Letters. doi: 10.1088/1748-9326/5/2/024011
- Edenhofer, O.; Carraro, C.; Köhler, J. und M. Grubb, Hrsg. (2006): Endogenous technological change and the economics of atmospheric stabilisation. A special issue of The Energy Journal 27, International Association for Energy Economics, USA

- Edwards, J. H. (1995): Potential sources of CO₂ and the options for its large-scale utilisation now and in future. *Catalysis Today* 23, 59-66.
- Hansen, J. B. (2011): Production of methanol from CO₂. 11th International Conference on Carbon Dioxide Utilization, June 27-30, 2011, Dijon (France)
- Houghton, R. A. (2005): Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emission. In: *Tropical Deforestation and Climate Change* (Eds. P. Mountino und S. Schwartzman), Amazon Institute for Environmental research (131 pp.), 13-21.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller), Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 996.
- Lackner, K. S.; P. Grimes und H. J. Ziock (1999): Capturing carbon dioxide from air. In: *24th Annual Technical Conference on Coal Utilization*, Clearwater, Florida (USA)
- MIT (2009): Retrofitting of coal-fired power plants for CO₂ emission reductions. An MIT Energy Initiative Symposium. 45.
- Möller, D. (2010): *Chemistry of the climate system*. De Gruyter, Berlin und New York, 722.
- Park, S.-E.; J.-S. Chang und K.-W. Lee, Hrsg. (2004): Carbon dioxide utilization for global sustainability. *Proceedings of the 7th International Conference on Carbon Dioxide Utilization*, Seoul, Korea. Elsevier Science & Technology, 626.
- Prentice, I. C.; G. D. Farquhar, M. J. R. Fasham, M. L. Goulden, M. Heimann, V. J. Jaramillo, H. S. Kheshgi, C. Le Quéré, R. J. Scholes und D. W. R. Wallace (2001): The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate change 2001: The scientific basis* (Eds. J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. Johnson), Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 183-237.
- Stolaroff, J. K., D. W. Keith und G. V. Lowry (2008): Carbon dioxide capture from atmospheric air using sodium hydroxide spray. *Environmental Science and Technology* 42, 2728-1735.
- Zeman, F. S. (2007): Energy and material balance of CO₂ capture from ambient air. *Environmental Science and Technology* 41, 7558-7563.
- Zeman, F. S. und K. S. Lackner (2004): Capturing carbon dioxide directly from the atmosphere. *World Resource Review* 16, 62-68.

[15.08.11]

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Detlev Möller
Lehrstuhl für Luftchemie und Luftreinhaltung
Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Arbeitsstelle Berlin
Vollmerstr. 13
D – 12489 Berlin
moe@btu-lc.fta-berlin.de