

Mining the Atmosphere

P. Richner, Departement Ingenieurwissenschaften, Empa, Dübendorf, CH

Abstract

Wollen wir unsere Klimaziele erreichen, so müssen wir nicht nur die Treibhausgasemissionen eindämmen, sondern auch das grosse Teile des bereits ausgestossenen CO₂ aus der Atmosphäre entfernen. Mining the Atmosphere zeigt, wie man dabei erst noch ein komplett neues Wirtschaftssystem erzeugt.

Billige Energie in Form von Kohle, Erdöl und Erdgas ist seit dem 19. Jahrhundert der Katalysator für einen Entwicklungsschub, wie er in so kurzer Zeit in der Geschichte der Menschheit noch nie erfolgte – und der bis heute andauert. Die Produktivität ist förmlich explodiert, die Lebenserwartung stieg in Europa um mehrere Jahrzehnte, und global war die Armutsrate noch nie so tief wie heute (auch wenn sie in vielen Regionen der Erde immer noch zu hoch ist). Gleichzeitig führte das rasante Wachstum aber auch zu einer Überbeanspruchung der natürlichen Ressourcen unseres Planeten. Die Folgen sind die schwindende Biodiversität und die Klimaerwärmung, beides stellt unsere heutige Lebensgrundlage langfristig in Frage.

Die Klimaerwärmung – und damit auch ein Teil der abnehmenden Biodiversität – ist auf die durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen zurückzuführen, vor allem in Form von CO₂ und Methan. Mit dem Paris-Abkommen aus dem Jahr 2015, das die Klimaerwärmung begrenzen soll, haben sich zahlreiche Staaten inklusive der Schweiz das Ziel gesetzt, ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Netto Null zu senken. Um dies zu erreichen, müssen wir sowohl die Energieeffizienz zahlreicher Prozesse unseres gesamten Lebens deutlich steigern als auch fossile Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzen. Einige Emissionen werden indes kaum zu verhindern sein, etwa in der Landwirtschaft und anderen Bereichen; um diese zu kompensieren – und unterm Strich tatsächlich bei Netto-Null zu landen –, sind «Negativemissionstechnologien» unabdingbar, mit denen sich die Menge an Treibhausgasen in der Atmosphäre aktiv reduzieren lässt.

Klar ist: Netto Null bis 2050 benötigt gewaltige Anstrengungen, die weit über das hinausgehen, was die Schweiz oder auch andere Länder bis heute beschlossen und umgesetzt haben. Kommt dazu, dass Netto Null lediglich ein erster Schritt ist; in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts müssen wir weltweit eine negative CO₂-Bilanz im Umfang von etwa 10 Milliarden Tonnen erzielen – pro Jahr! Der Grund dafür ist die Langlebigkeit von CO₂ in der Atmosphäre. Während das viel potentere Treibhausgas Methan innert weniger Jahrzehnte vollständig abgebaut ist, wird einmal emittiertes CO₂ auf natürlichem Weg erst im Verlauf von vielen Jahrhunderten wieder aus der Atmosphäre eliminiert. Folglich wird die Klimaerwärmung auch bei Netto Null nicht «über Nacht» haltmachen oder gar zurückgehen. Lassen wir die Temperaturen allerdings weiterhin auf einem deutlich erhöhten Niveau, dürfte es zu irreversiblen Veränderungen im Klimasystem der Erde mit kaum abschätzbaren Konsequenzen kommen, etwa das Abschmelzen des Eisschildes von Grönland, was alleine einen Anstieg des Meeresspiegels um knapp sieben Meter zur Folge hätte.

CO₂ als Ressource

Doch selbst, wenn es unserem Energiesektor gelingt, sich von Kohle, Öl und Gas zu lösen, ist eine weitere Herausforderung zu meistern: Erdöl und Co. dienen als Ausgangsmaterialien für die unterschiedlichsten kohlenstoffhaltigen Materialien, angefangen bei Kerosin über Polymere und Medikamente bis hin zu Bitumen für die Asphaltierung unserer Strassen. All diese Materialien aus Biomasse herzustellen ist rein technisch kaum möglich und würde wohl auch das nachhaltig zur Verfügung stehende Angebot an Biomasse weit übersteigen. Will heissen: Wir benötigen eine neue Kohlenstoffquelle.

Die Antwort auf diese zweifache Herausforderung lautet «Mining the Atmosphere». Die Idee: Das vom Menschen verursachte überschüssige CO₂ wird der Atmosphäre wieder entzogen und als Ausgangsmaterial für kohlenstoffhaltige Materialien verwendet. Diese verwenden wir dann möglichst lange in geschlossenen Kreisläufen, bevor sie in finalen Senken landen. So stellen wir eine Fixierung des Kohlenstoffs für mehr als 1000 Jahren sicher. Die dazu notwendige Entwicklung von Materialien und Prozessen fördert so letztlich den Übergang von einer CO₂-emittierenden zu einer CO₂-bindenden Gesellschaft.

Die Empa-Forschungsinitiative «Mining the Atmosphere» ist – dem Forschungsthema entsprechend – langfristig ausgelegt und umfasst verschiedene «Pfeiler»: CO₂-Gewinnung, dessen Umwandlung, Anwendungen der neuartigen Materialien in verschiedensten Bereichen und systemische Betrachtungen wie Lebenszyklusanalysen. Egal, welche Lösungswege wir künftig auch entwickeln, eines dürfen wir dabei nie aus den Augen verlieren – die Einhaltung der planetaren Grenzen.

Ein Schlüsselement ist die ausschliessliche Verwendung erneuerbarer Energie in allen Bereichen bzw. die Frage, ob diese in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Unsere Überlegungen gehen davon aus, dass dies in einigen Jahrzehnten der Fall sein wird. Das Potential ist zweifellos vorhanden: Die Sonne schickt rund 10'000-mal mehr Energie zur Erde, als wir heute brauchen. Dazu kommt, dass rund 99% unseres Planeten heisser sind als 1'000 Grad – um nur die zwei der wichtigsten nachhaltigen Energiequellen zu nennen.

Den «atmosphärischen Rohstoff» CO₂ kann man aus drei Quellen gewinnen: direkt aus der Luft mittels «Direct Air Capture» (DAC), durch elektrolytische Verfahren aus den Ozeanen, die rund ein Drittel des anthropogenen CO₂ absorbieren, und aus Biomasse. CO₂ aus der Luft und aus den Ozeanen kann dann direkt in geeignete geologische Formationen eingelagert werden («Carbon Capture and Storage», CCS). Mit «Mining the Atmosphere» verfolgen wir allerdings einen alternativen Weg, bei dem CO₂ mittels Wasserstoff in kurz- oder längerfristige Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird und damit die bisherigen fossilen Rohstoffe ersetzen kann. Gleichzeitig können bestehende Logistikketten weiterverwendet werden, es sind ja chemisch gesehen die gleichen Verbindungen. Schlüsselemente für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Idee sind katalytische Prozesse für die diversen chemischen Umwandlungsreaktionen und vor allem das Energiemanagement. Denn das «Gesamtpaket» benötigt jede Menge Energie. Viele dieser Prozesse werden daher kaum in der Schweiz ablaufen, sondern eher dort, wo erneuerbare Energie im Übermass vorhanden ist, etwa im Sonnengürtel der Erde.

In einer ersten Phase fokussieren wir auf zwei «Use cases» für die Anwendung CO₂-basierter Materialien: Massenprodukte mit dem Potential, Milliarden Tonnen Kohlenstoff zu binden, und Produkte mit einer hohen Wertschöpfung, die dadurch einen massgeblichen Beitrag zu Finanzierung des Vorhabens beisteuern. Baumaterialien haben den mit Abstand grössten Anteil an den globalen Materialflüssen. Kohlenstoff-basierte Zuschlagstoffe für Beton und Asphalt sowie thermische Isolationsmaterialien stehen daher derzeit im Zentrum unserer Forschung. Die Kohle kann entweder über die Pyrolyse von Biomasse oder von synthetischem Methan gewonnen werden, was zudem Wasserstoff für energetische Anwendungen liefert.

Mit «Mining the Atmosphere» wollen wir einen gangbaren Weg aufzeigen, wie sich Klimaveränderungen mit unkalkulierbaren Risiken vermeiden lassen. Damit wir auf diesem Weg aber auch unser Ziel erreichen, müssen wir zunächst einmal unsere Treibhausgasemissionen schnell und massiv senken und den Ausbau erneuerbarer Energien deutlich beschleunigen. Mit «Mining the Atmosphere» bereiten wir bereits den nächsten Schritt vor – das grosse Säubern unserer CO₂-verschmutzten Atmosphäre.

Willkommen
Welcome
Bienvenue



Mining the Atmosphere

25. Symposium für Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen

7. Juni 2024, Dübendorf

Dr. Peter Richner

Stellvertretender Direktor Empa

A screenshot of a Swiss referendum page. At the top left, it says "Volksabstimmungen" with a back arrow. The main title is "Klima- und Innovationsgesetz" with a small icon to its right. Below the title, it says "Volksabstimmung vom 18. Juni 2023". To the right of this, there is a large percentage "Ja 59.07%". Below the title, there is a short summary: "Am 18. Juni 2023 haben die Schweizer Stimmberechtigten über das Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (indirekter Gegenvorschlag zur Gletscher-Initiative) abgestimmt." Below this, there is a table with one row: "OECD/G20-Mindestbesteuerung".

Art. 3 Ziel der Verminderung von Treibhausgasemissionen und der Anwendung von Negativemissionstechnologien

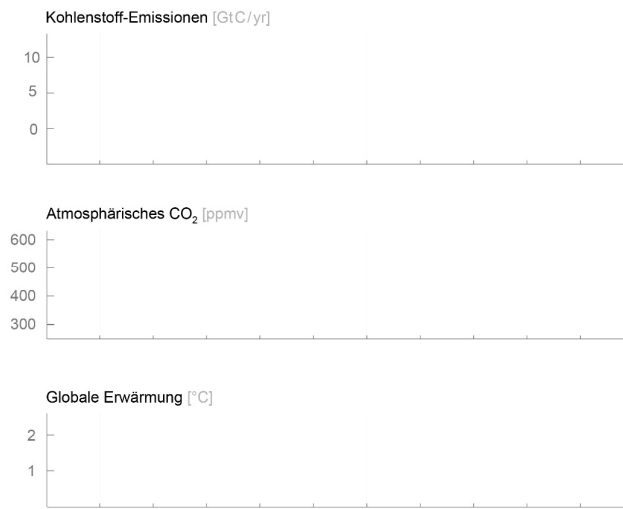
¹ Der Bund sorgt dafür, dass die Wirkung der in der Schweiz anfallenden von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 Null beträgt (Netto-Null-Ziel), indem:

- a. die Treibhausgasemissionen so weit möglich vermindert werden; und
- b. die Wirkung der verbleibenden Treibhausgasemissionen durch die Anwendung von Negativemissionstechnologien in der Schweiz und im Ausland ausgeglichen wird.

² Nach dem Jahr 2050 muss die durch die Anwendung von Negativemissionstechnologien entfernte und gespeicherte Menge an CO₂ die verbleibenden Treibhausgasemissionen übertreffen.

Unsere CO₂-Emissionen

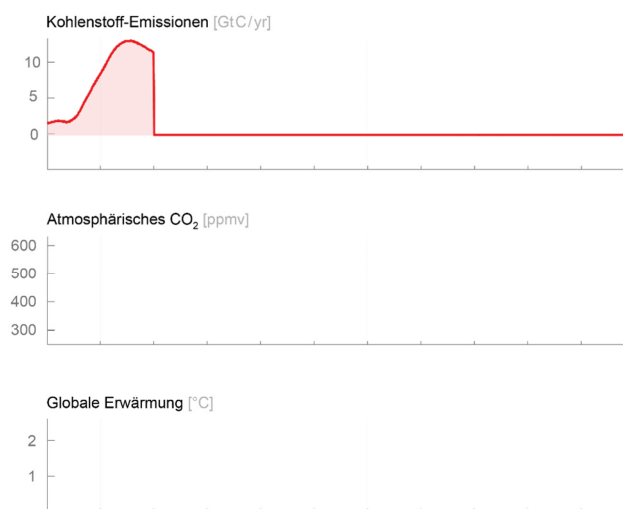
Altlasten für die Zukunft



Solomon et al. 2009

Unsere CO₂-Emissionen

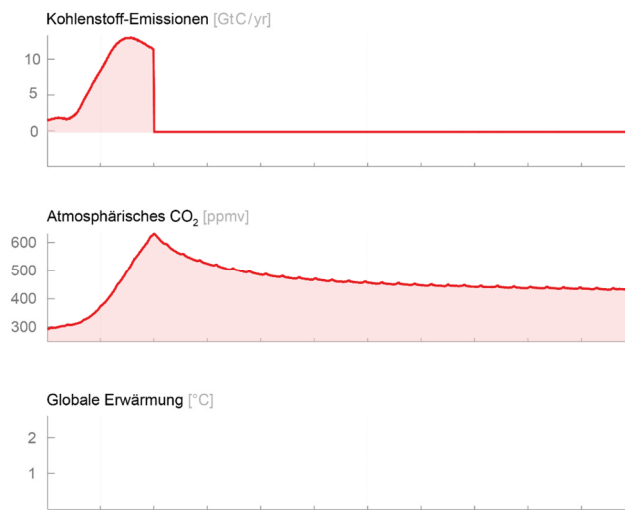
Altlasten für die Zukunft



Solomon et al. 2009

Unsere CO₂-Emissionen

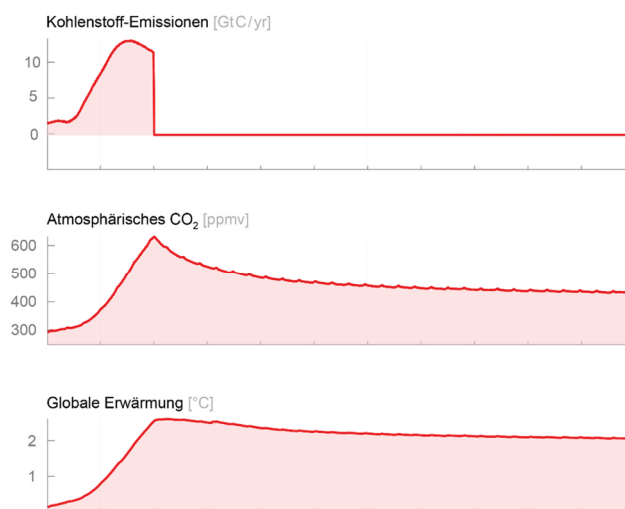
Altlasten für die Zukunft



Solomon et al. 2009

Unsere CO₂-Emissionen

Altlasten für die Zukunft



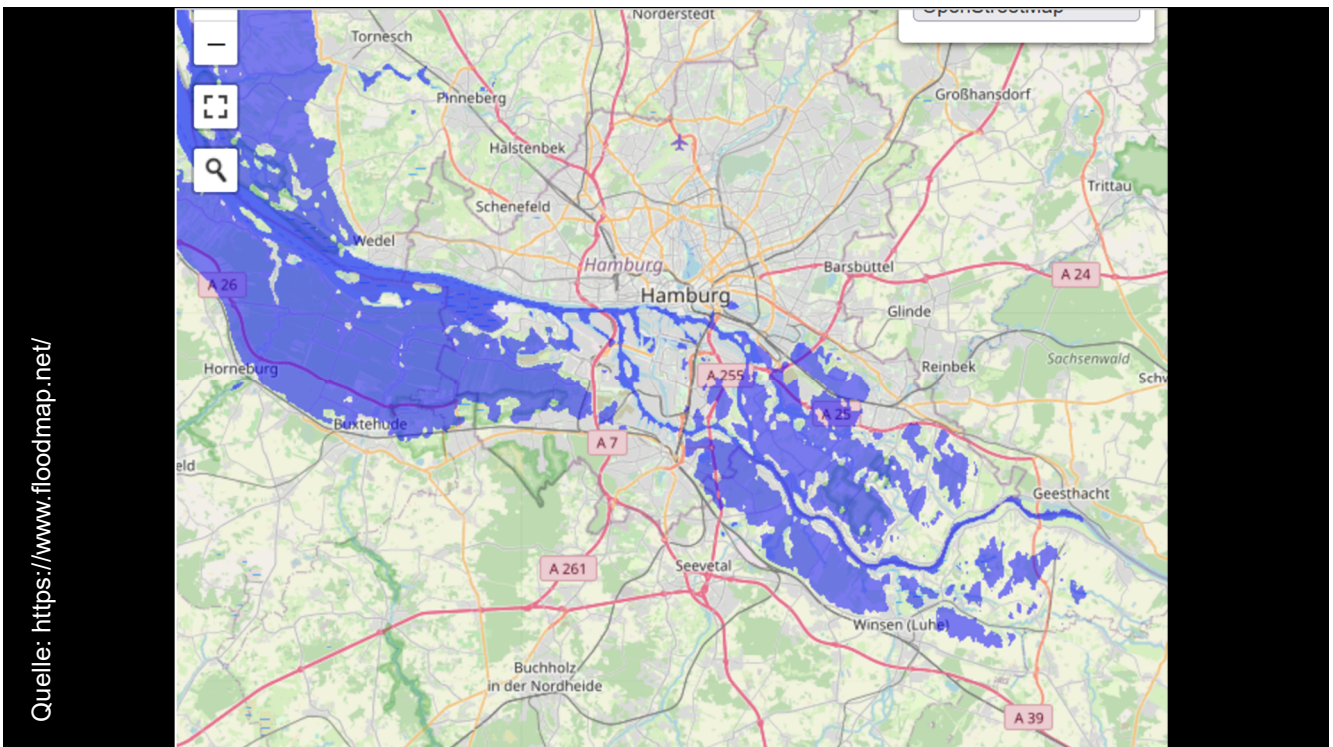
Solomon et al. 2009

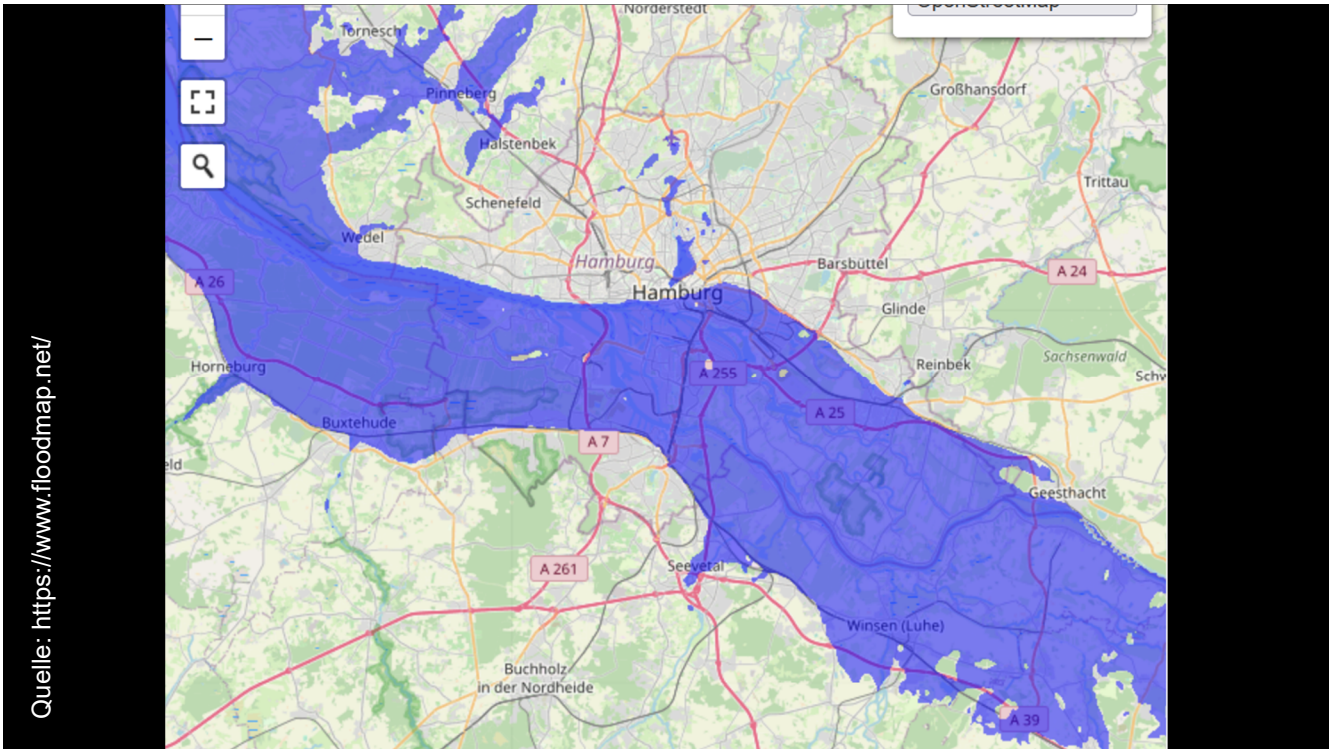
Ist das ein Problem?

Copyright: Stefan Forster

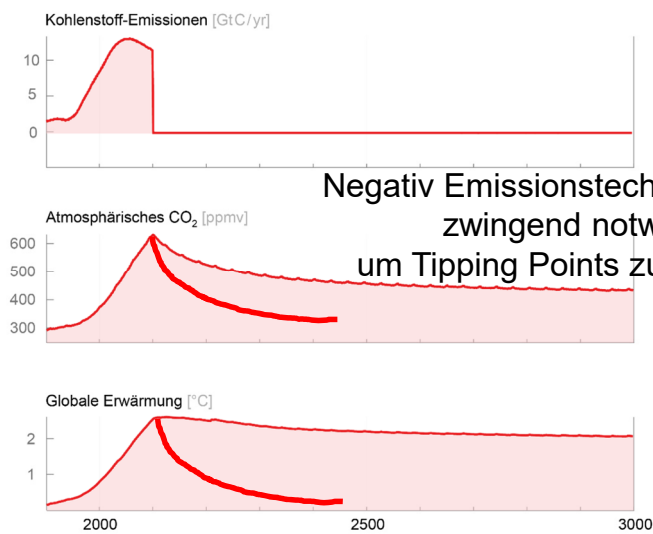


Eismasse von Grönland ≈ Meeresspiegelanstieg von 7 m



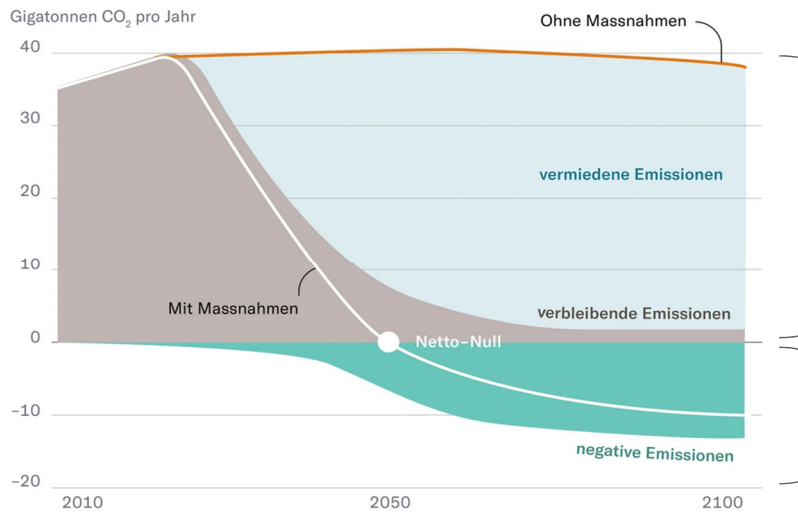


Unsere CO₂-Emissionen Altlasten für die Zukunft



Negativ Emissionstechnologien sind
zwingend notwendig
um Tipping Points zu vermeiden

Netto Null ist nur der Anfang



1

CO₂ so weit wie möglich reduzieren

Energiesystem decarbonisieren

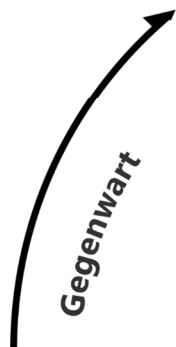
Unvermeidbare Emissionen neutralisieren

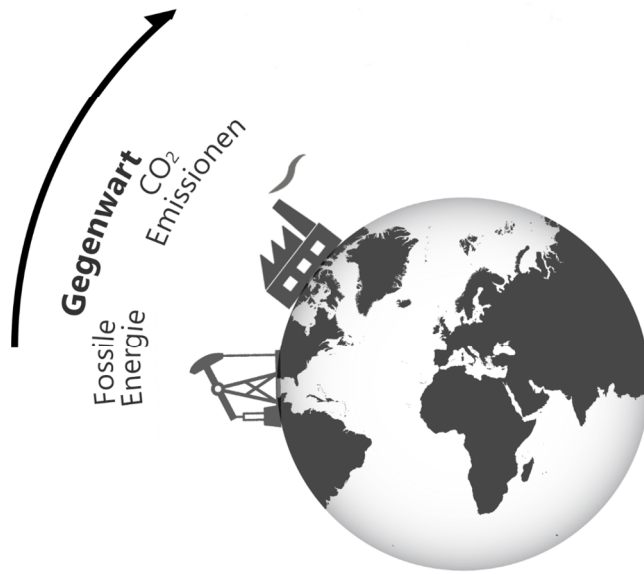
2

CO₂ aus der Atmosphäre entfernen

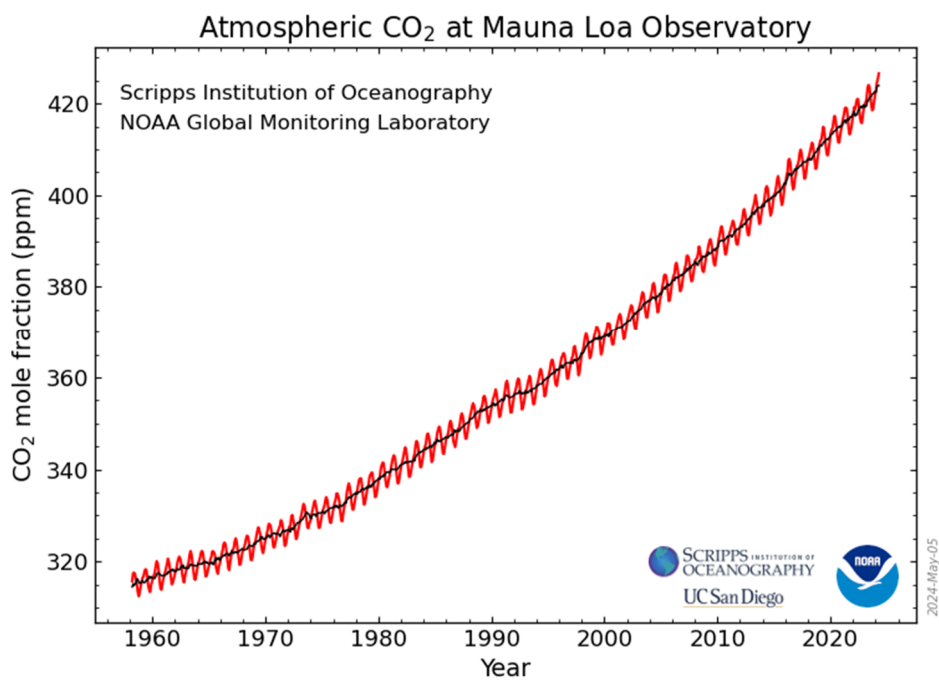
Negative Emissionen realisieren

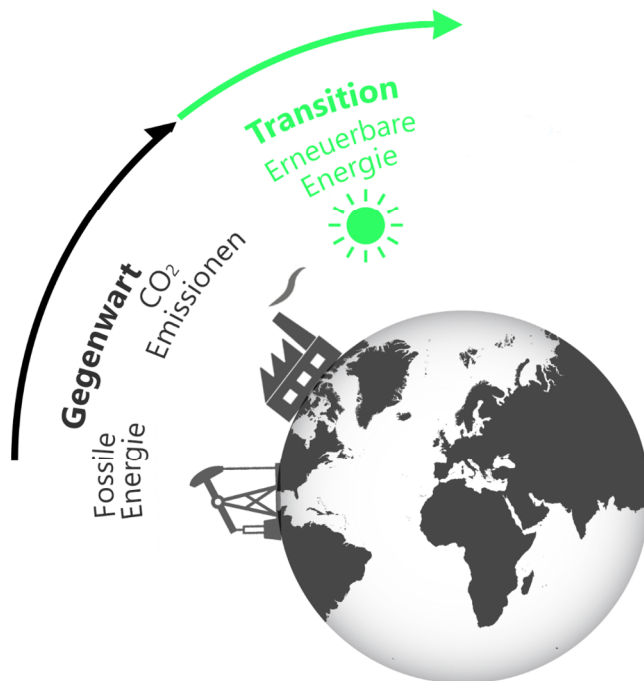
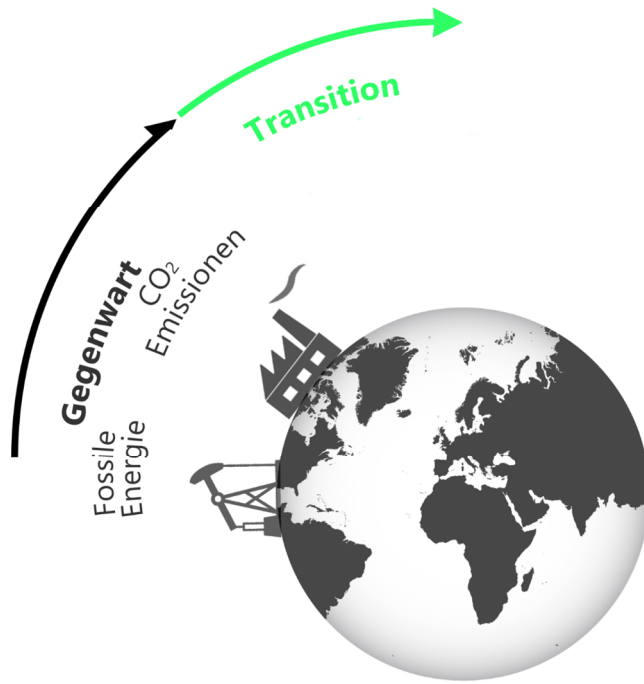
Quelle: IPCC, NZZ





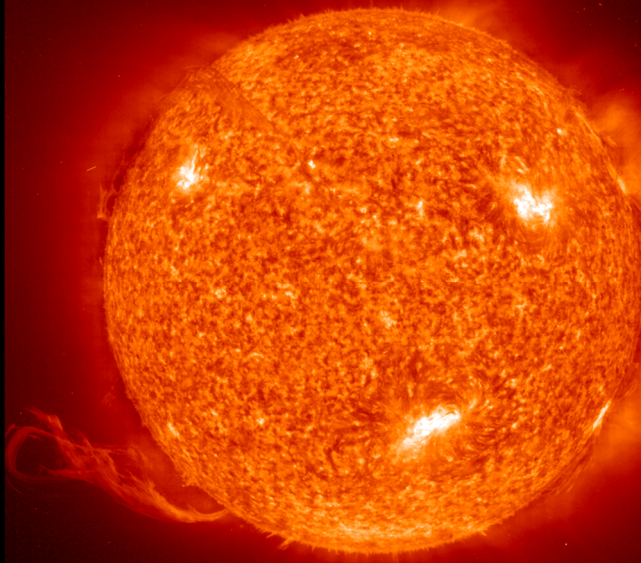
Quelle: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>





Sonnenenergie:
 $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh/a

Globaler Energiebedarf:
 $1,7 \cdot 10^{14}$ kWh/a
 $\approx 0.01\%$



Ausbau von PV im Sonnengürtel der Erde



- Oman plant die Installation von 4 GW PV bis 2030 (500 MW schon in Betrieb)
- Gestehungskosten: **1-2 Ct/kWh**

Oman kicks off tender for 500 MW of PV

The Omani authorities aim to develop a 500 MW solar project in Ibbri, in northwestern Oman, where other PV facilities are located.

JANUARY 9, 2024 EMILIANO BELLINI

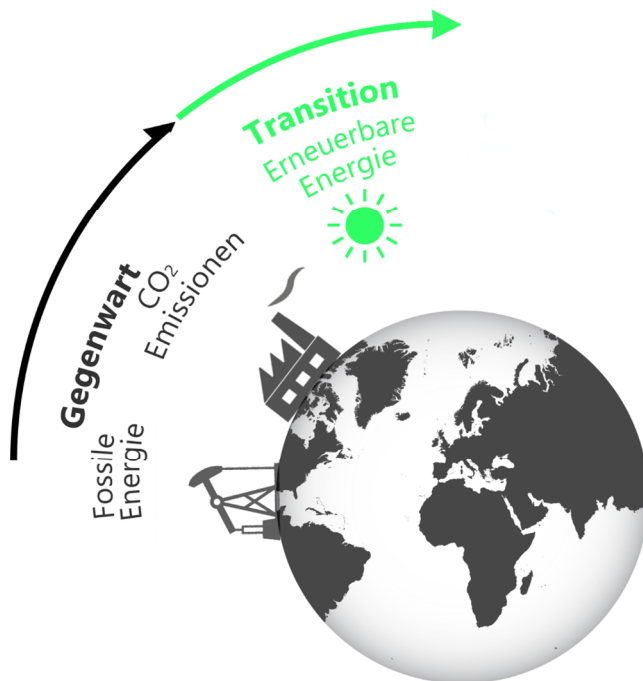
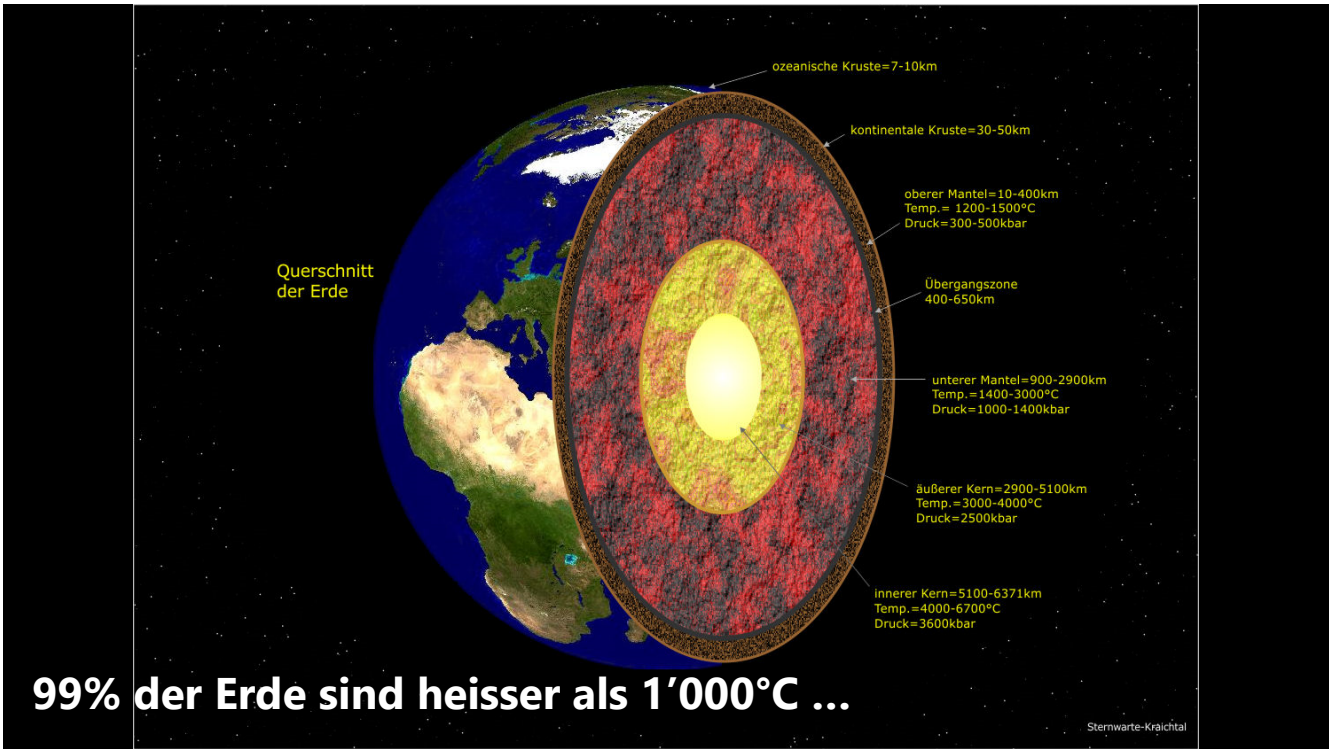
MARKETS UTILITY SCALE PV OMAN

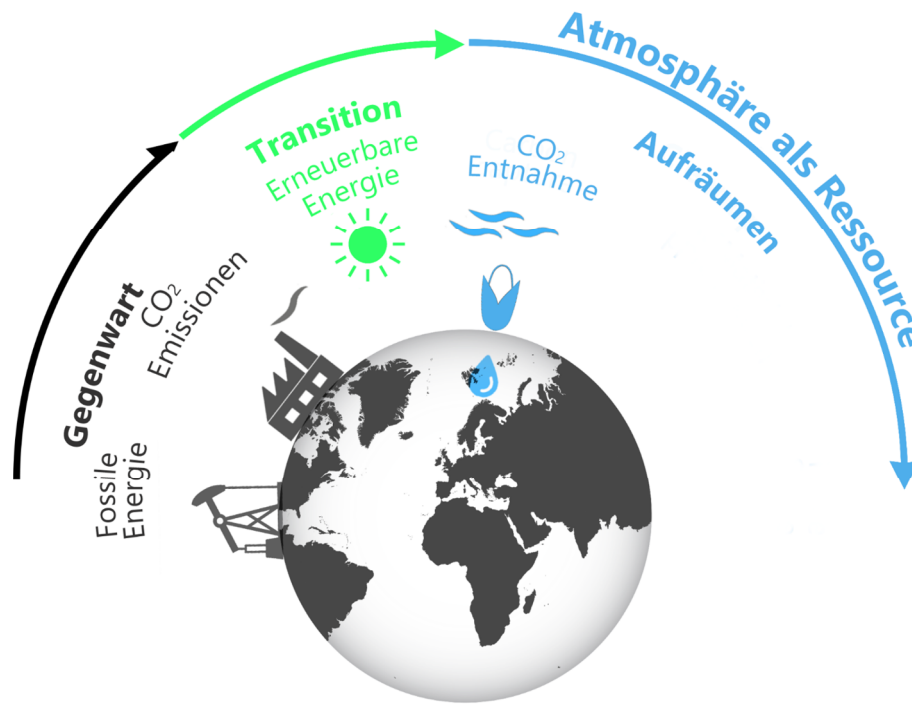


Sterling and Wilson Solar built this 125 MWp project in Oman
Image: Sterling and Wilson Solar

Share     

Oman Power and Water Procurement Co. (OPWP) has launched a tender to select independent power producers (IPP) to build a 500 MW solar park.





Quellen für die CO₂ Entnahme



Quellen für die CO₂ Entnahme



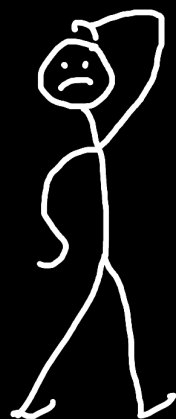
Ab.

Erneuerbare Energie

Prozesstechnik



Pyrolyseprozess



Und wer soll das bezahlen?

Atmosphäre

1'280 Gt CO₂ 1850-2022

ca. 600 Gt CO₂ müssen
zurückgeholt werden



Carbon Capture and Storage (CCS)

Mammoth-Anlage von Climeworks in Island



Atmosphäre

1'280 Gt CO₂ 1850-2022

Ca. 600 Gt CO₂ müssen
zurückgeholt werden

Kosten Climeworks

ca. CHF 600/t



Sondermülldeponie Kölliken

664'000 t kontaminiertes
und entferntes Material

Gesamtkosten 850 Mio

CHF 1'280/t



Sondermülldeponie Bonfol

175'000 t kontaminiertes
und entferntes Material

Gesamtkosten 380 Mio

CHF 2'170/t



Atmosphäre

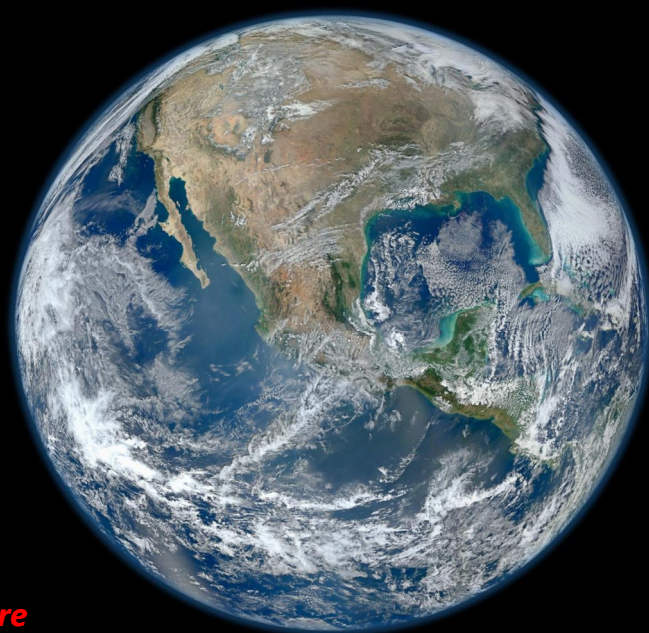
1'280 Gt CO₂ 1850-2022

Ca. 600 Gt CO₂ müssen
zurückgeholt werden

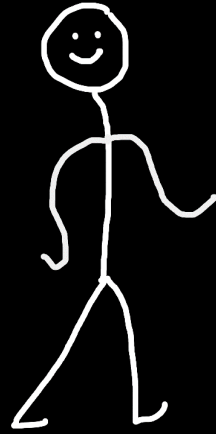
Kosten Climeworks

ca. CHF 600/t

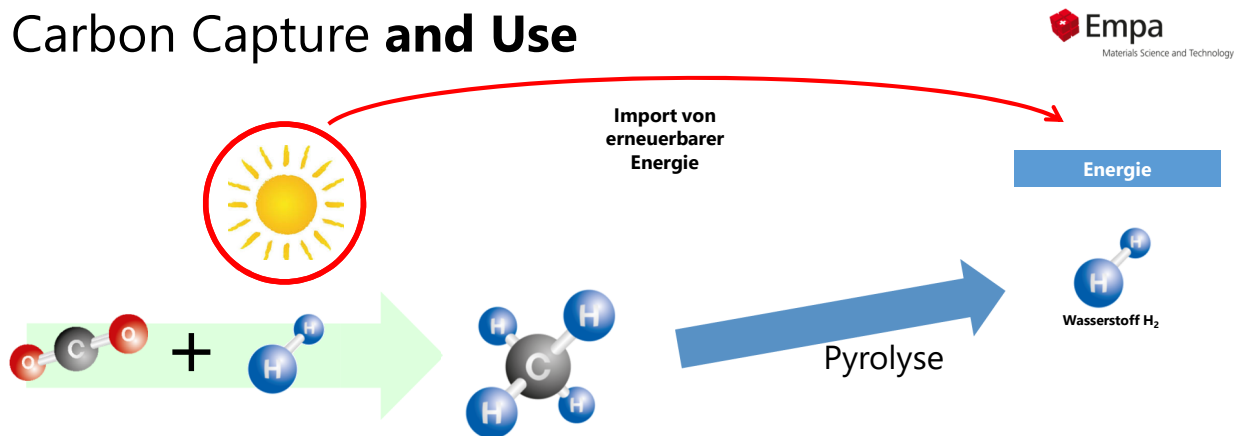
**≈ CHF 360 Bio.
bzw. CHF 2.1 Bio/a über 170 Jahre**



Added Value generieren!

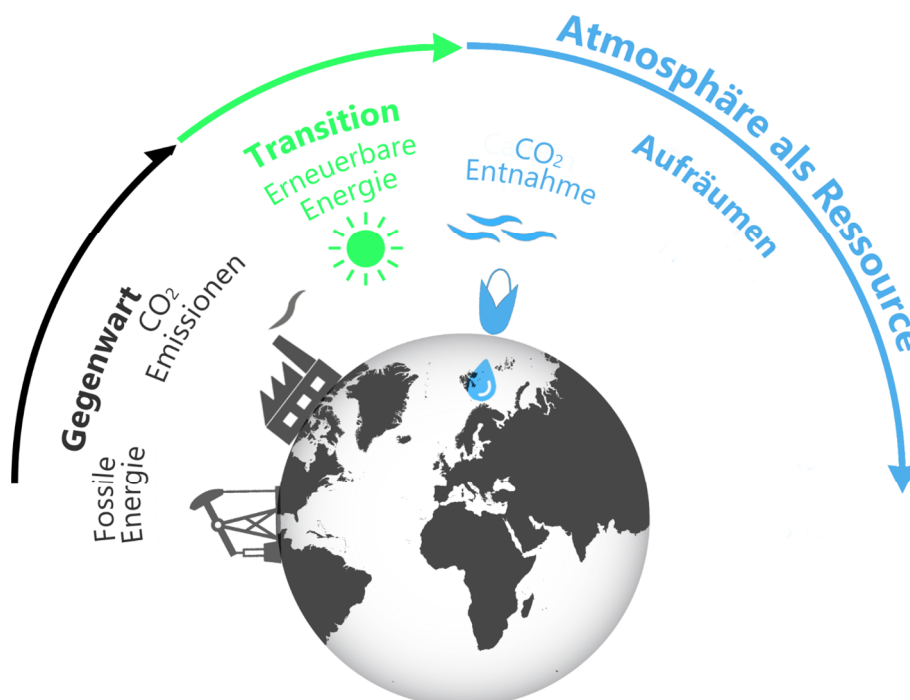


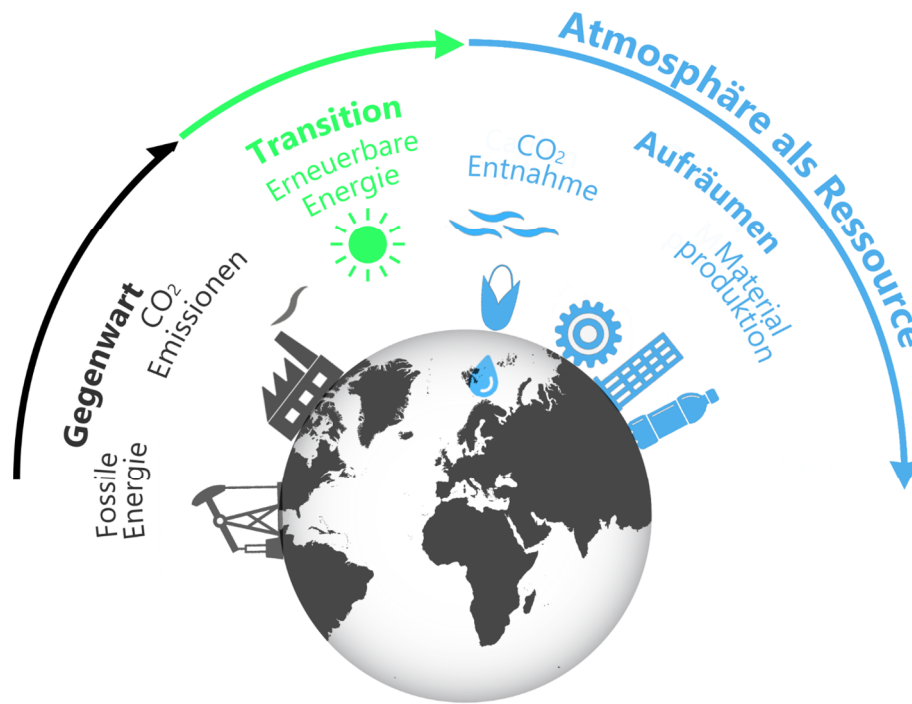
Carbon Capture and Use



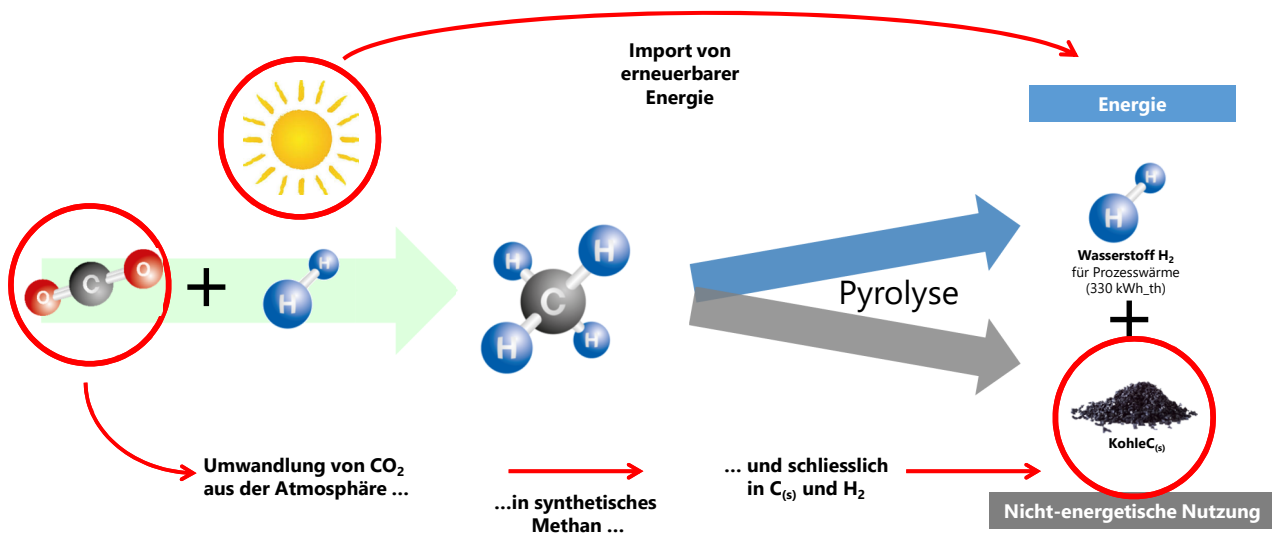
Deckung der CH-Winterstromlücke von 8 TWh

- 1.5 TWh in einem LNG-Tanker mit 250'000 m³
- 50% Verlust bei Pyrolyse -> 20 Tanker um 8 TWh Winterstrom zu importieren
(heute: ca. 90 Tanker Rohöl)





Carbon Capture and Use



Article

Global human-made mass exceeds all living biomass


<https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>

Emily Elhacham¹, Liad Ben-Uri¹, Jonathan Grozovski¹, Yinon M. Bar-On¹ & Ron Milo^{1✉}

Received: 1 November 2019

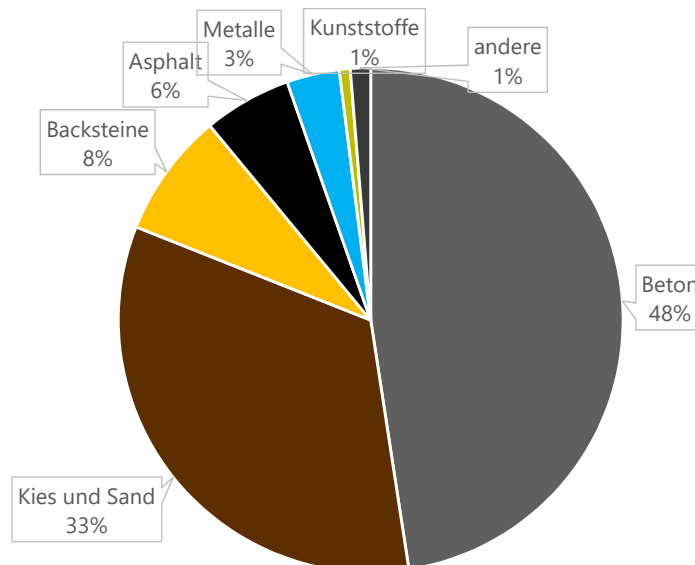
Accepted: 9 October 2020

Published online: 9 December 2020

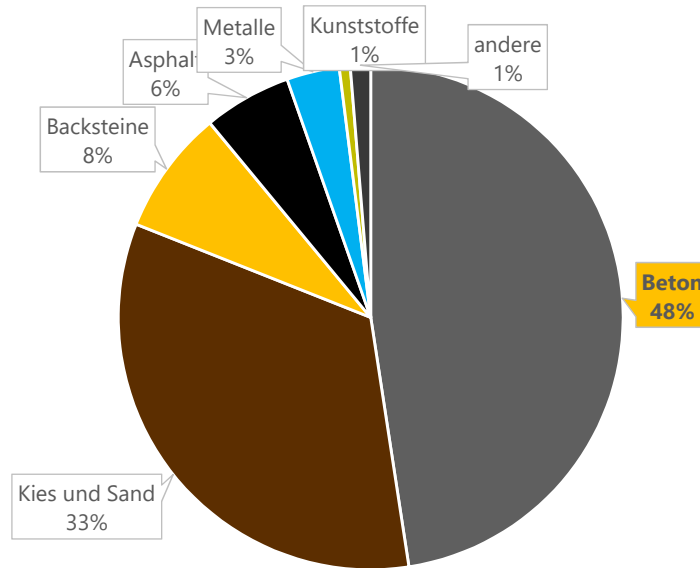
 Check for updates

Humanity has become a dominant force in shaping the face of Earth^{1–9}. An emerging question is how the overall material output of human activities compares to the overall natural biomass. Here we quantify the human-made mass, referred to as ‘anthropogenic mass’, and compare it to the overall living biomass on Earth, which currently equals approximately 1.1 teratonnes^{10,11}. We find that Earth is exactly at the crossover point; in the year 2020 (± 6), the anthropogenic mass, which has recently doubled roughly every 20 years, will surpass all global living biomass. On average, for each person on the globe, anthropogenic mass equal to more than his or her bodyweight is produced every week. This quantification of the human enterprise gives a mass-based quantitative and symbolic characterization of the human-induced epoch of the Anthropocene.

Zusammensetzung menschgemachter Materialien



Zusammensetzung menschengemachter Materialien



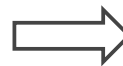
CO₂-negativer Beton – mehr als ein Traum

Kohlenstoffpulver



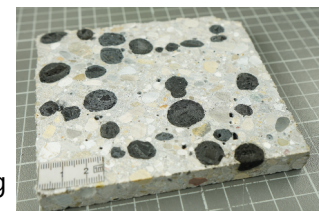
Granulierung
mit Zement

Leichte Gesteinskörnung



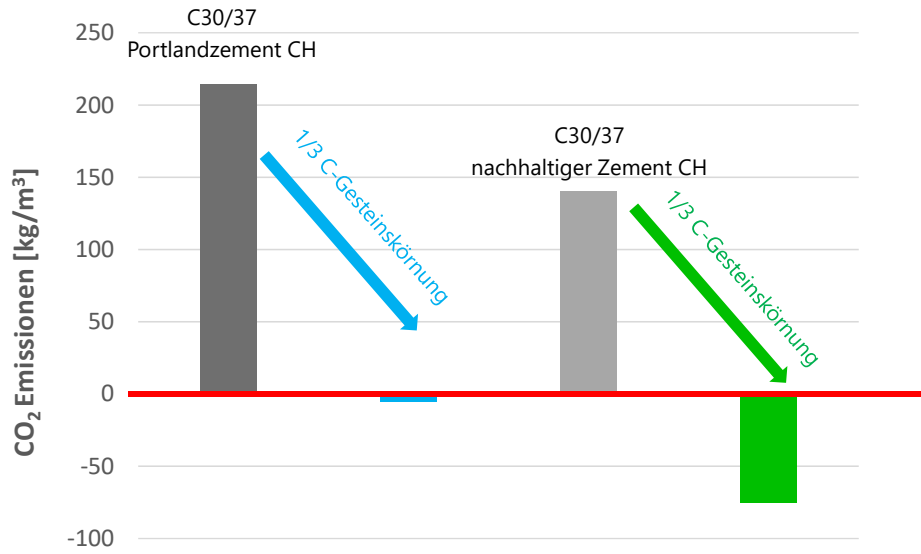
1/4
C-Gesteinskörnung

Leichtbeton



Festigkeitsklasse C30/37

CO₂-negativer Beton – mehr als ein Traum



Wyrzykowski, Lura et. al.; J. of Cleaner Production, 434 (2024)

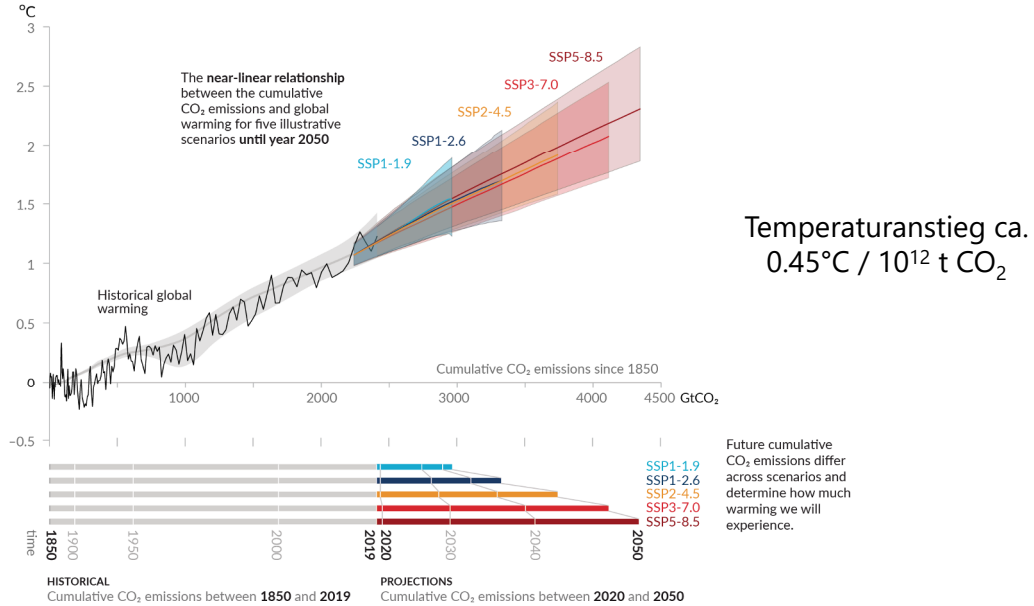
Beton als permanente Kohlenstoffsенke

Senkenpotential

- Globaler Betonbedarf ca. 35 Mrd t/a
- 10% m/m C im Beton 3.5 Mrd t C bzw. 13 Mrd t CO₂

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

Global surface temperature increase since 1850–1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



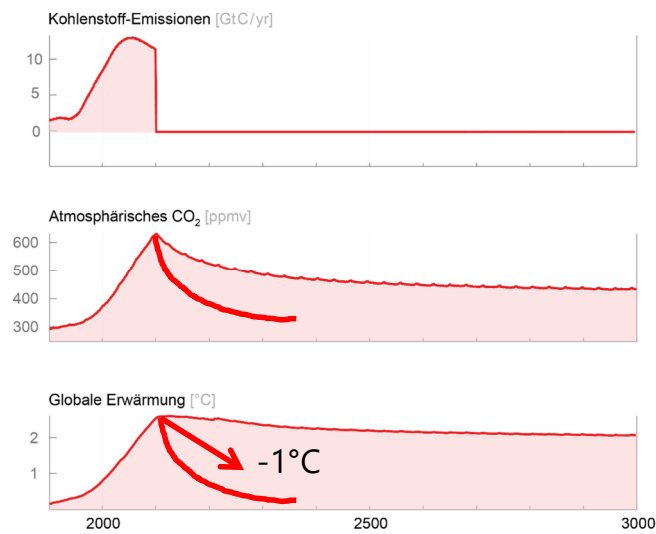
Beton als permanente Kohlenstoffsенke

Senkenpotential

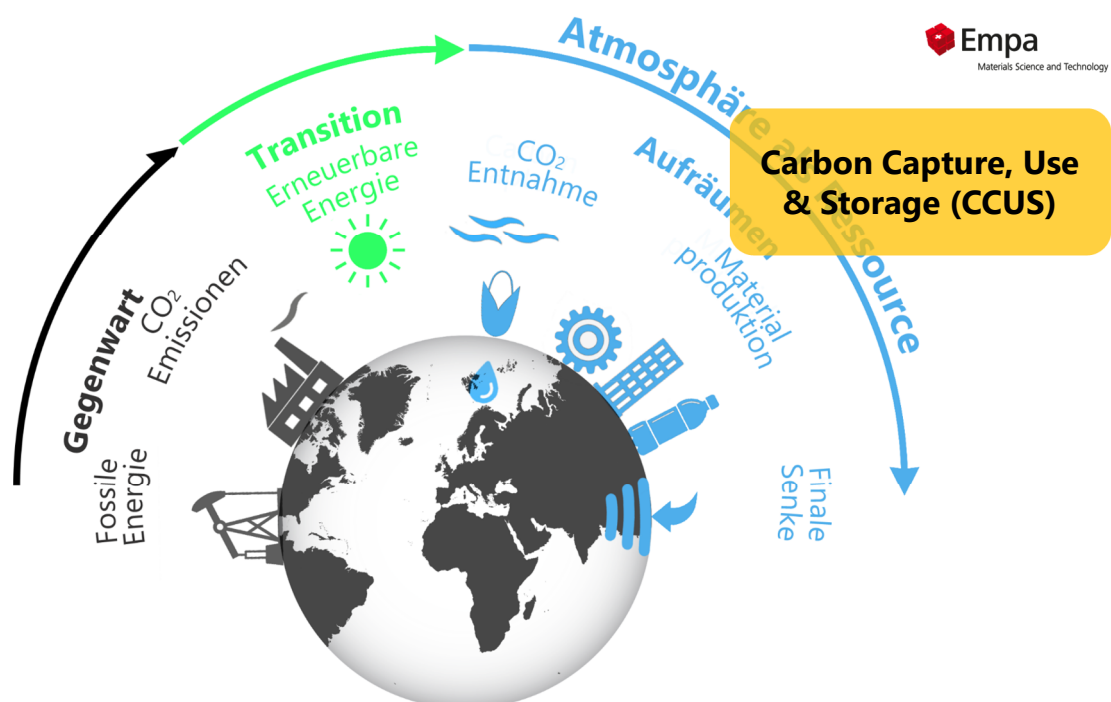
- Globaler Betonbedarf ca. 35 Mrd t/a
- 10% m/m C im Beton 3.5 Mrd t C bzw. 13 Mrd t CO₂
- Temperaturreduktion
 - 0.006°C / a
 - 0.06°C / Dekade
 - 0.6°C / Jahrhundert
 - **1°C in 170 Jahren**

Unsere CO₂-Emissionen

Altlasten für die Zukunft

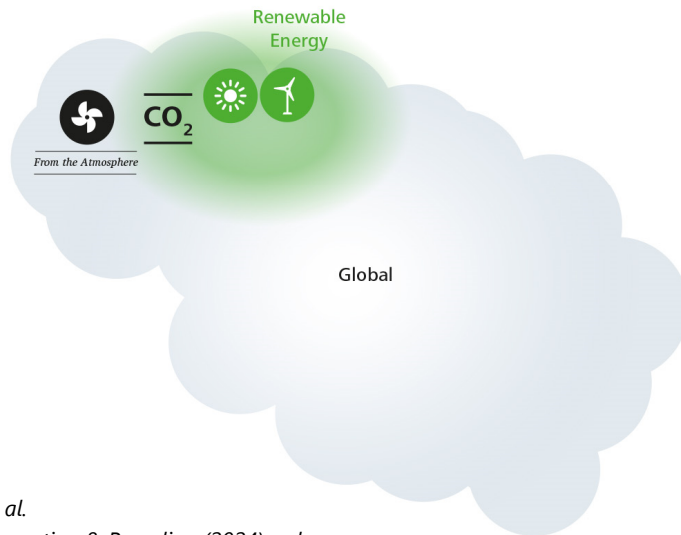


Solomon et al. 2009



Forschungsplan Mining the Atmosphere

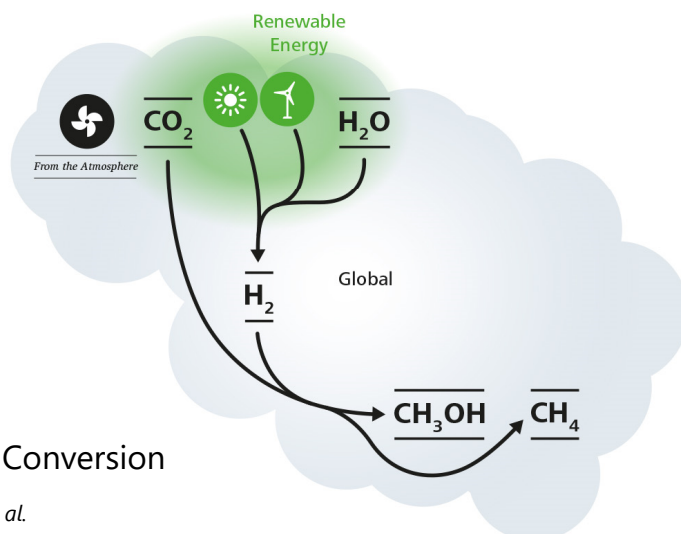
CO₂ Capture



Lura, Richner et al.
Resources, Conservation & Recycling (2024), subm.

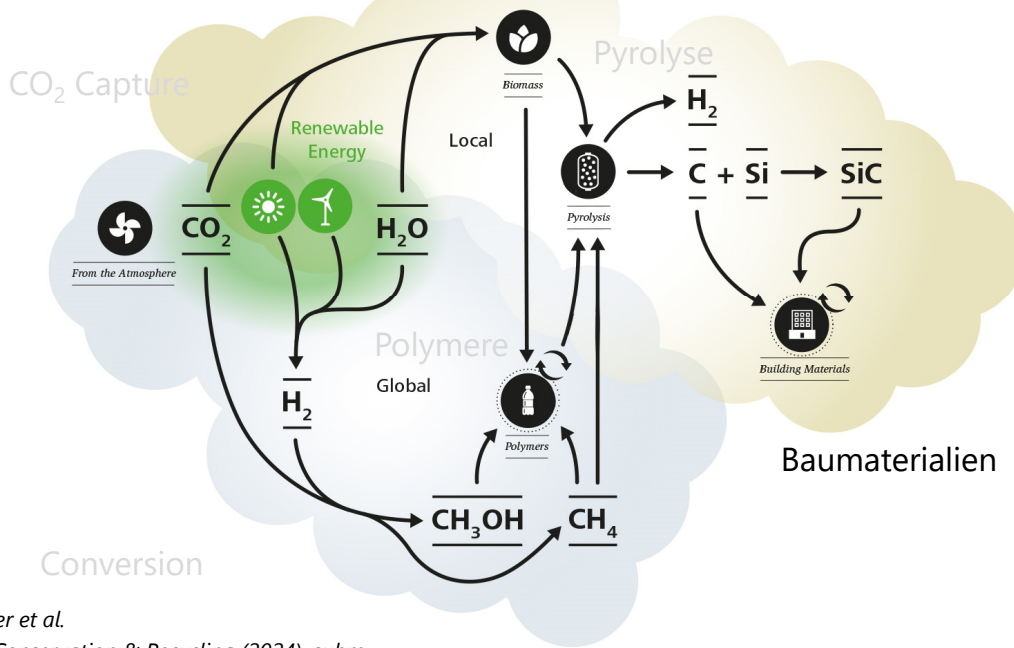
Forschungsplan Mining the Atmosphere

CO₂ Capture



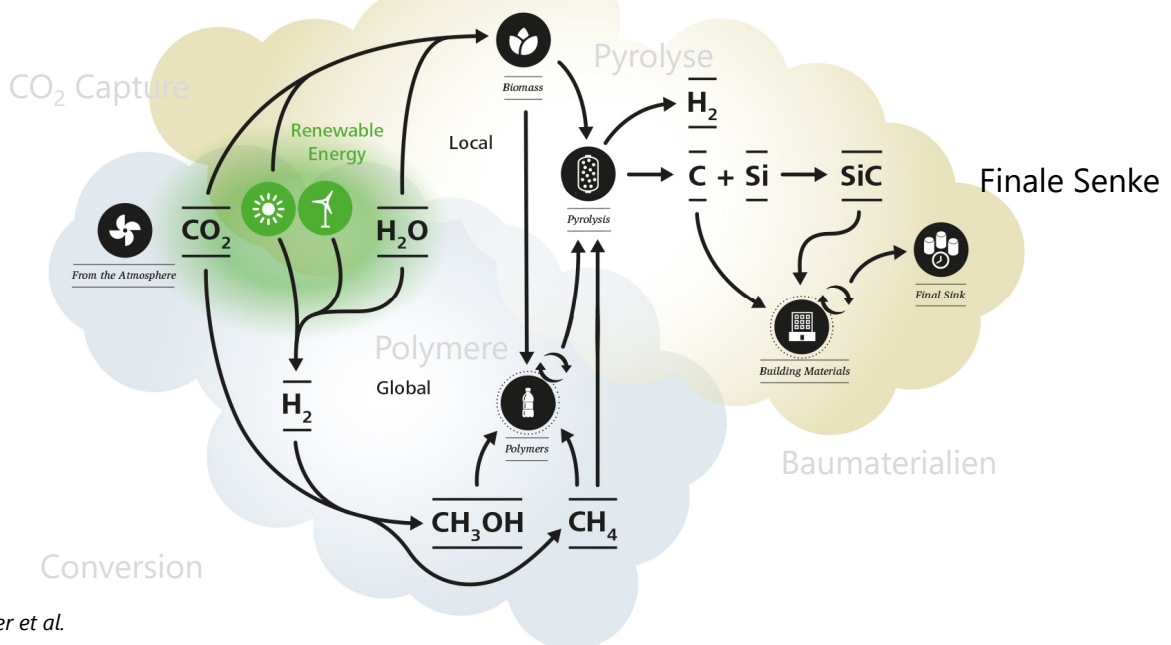
Lura, Richner et al.
Resources, Conservation & Recycling (2024), subm.

Forschungsplan Mining the Atmosphere



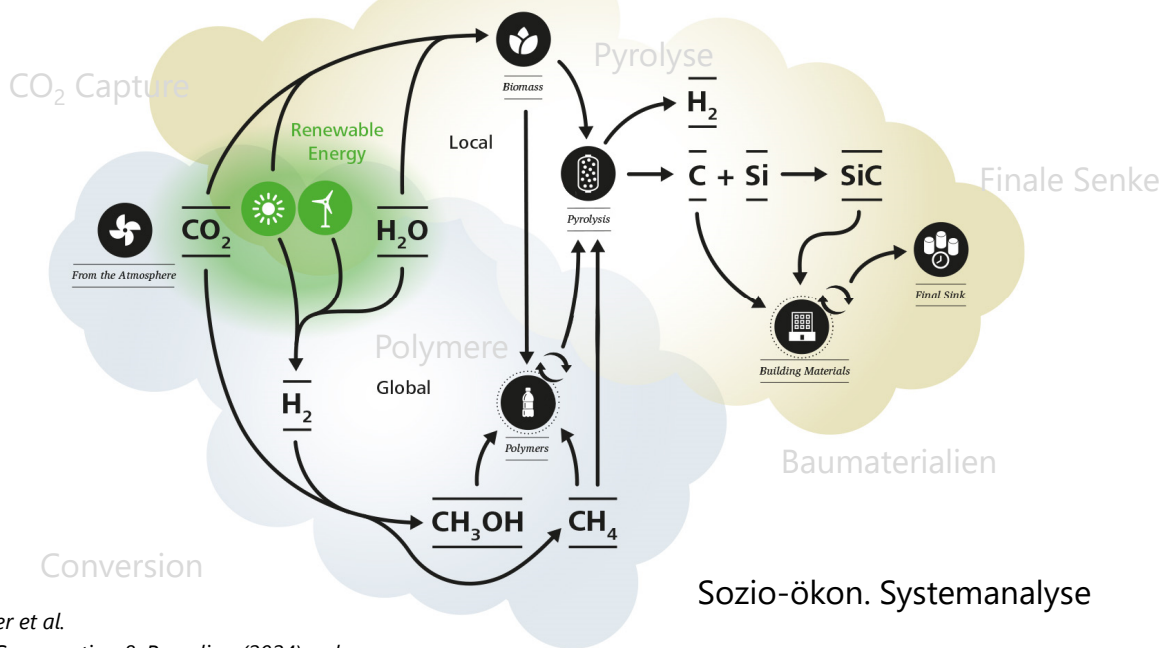
Lura, Richner et al.
Resources, Conservation & Recycling (2024), subm.

Forschungsplan Mining the Atmosphere



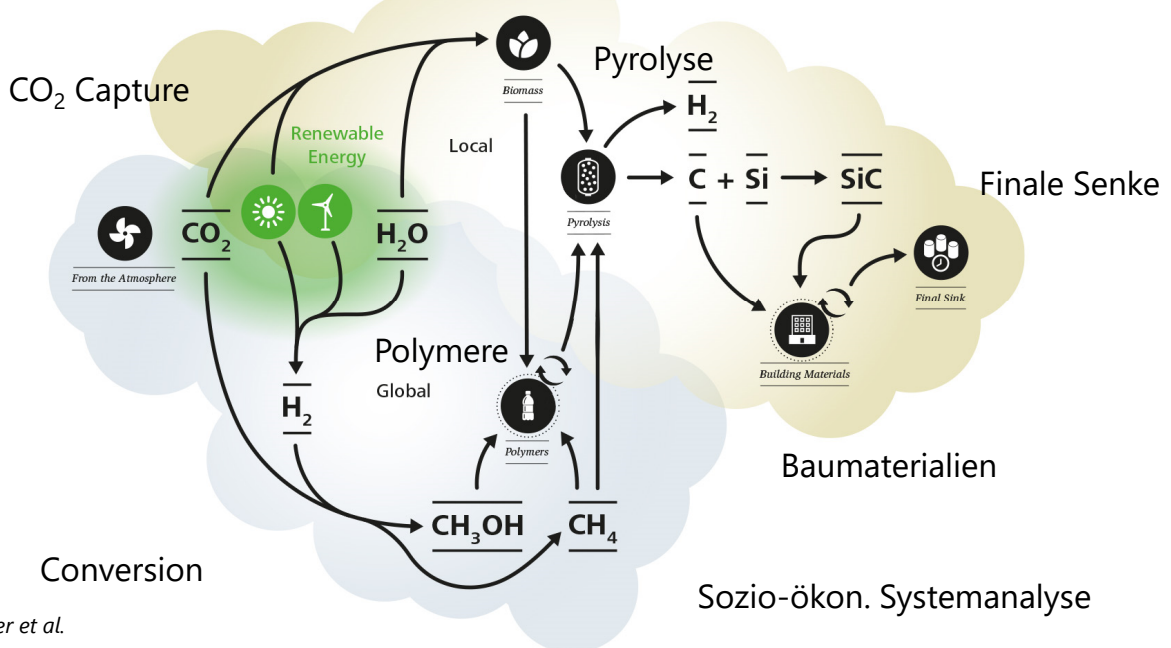
Lura, Richner et al.
Resources, Conservation & Recycling (2024), subm.

Forschungsplan Mining the Atmosphere

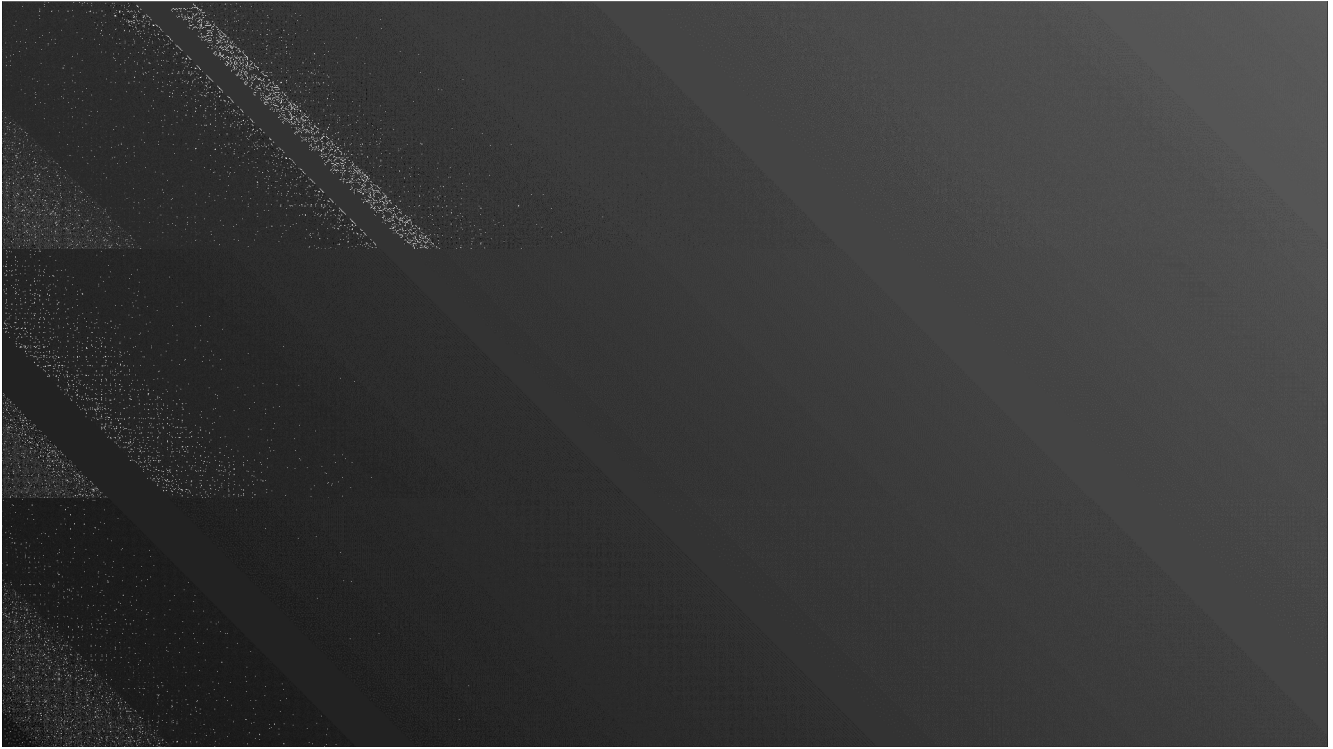


Lura, Richner et al.
Resources, Conservation & Recycling (2024), subm.

Forschungsplan Mining the Atmosphere



Lura, Richner et al.
Resources, Conservation & Recycling (2024), subm.



Wir schaffen das nur im Team –



 **Empa**
Materials Science and Technology

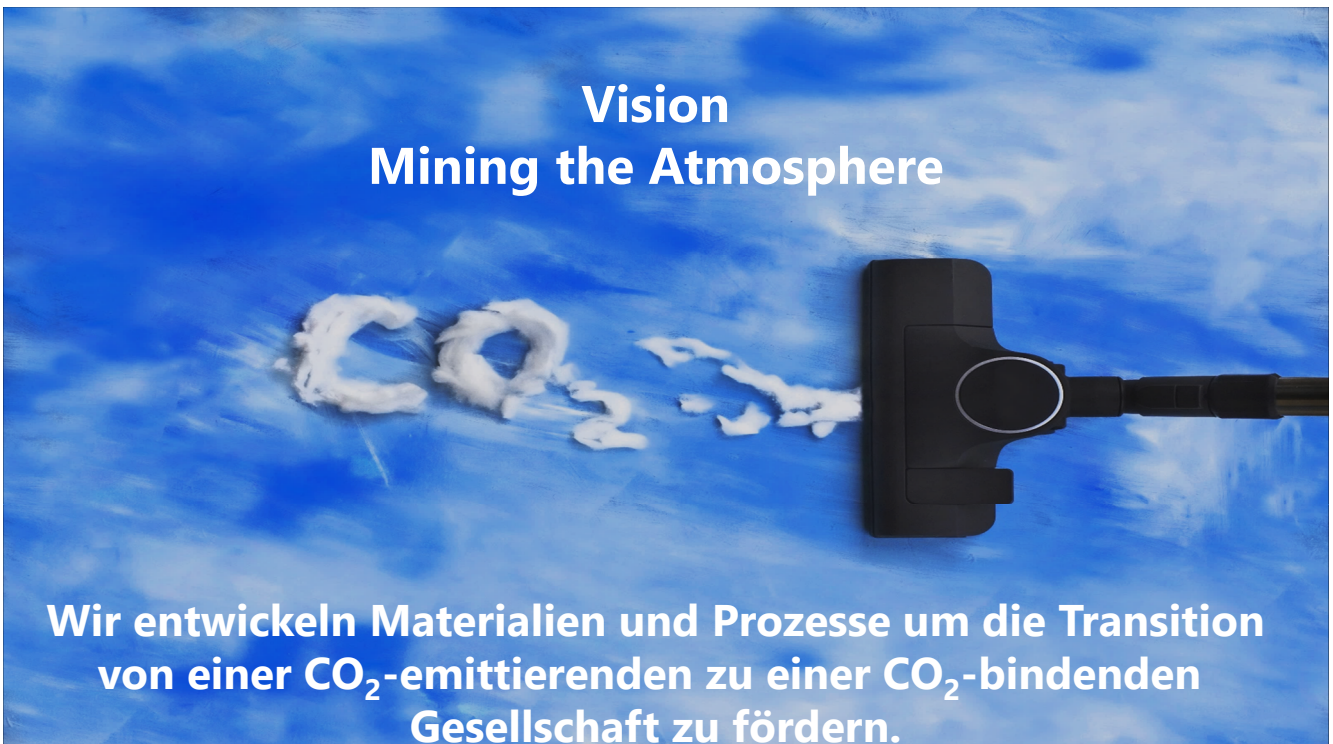




Wir schaffen das nur im Team –
Sind Sie dabei?



Empa
Materials Science and Technology



Vision
Mining the Atmosphere

Wir entwickeln Materialien und Prozesse um die Transition von einer CO₂-emittierenden zu einer CO₂-bindenden Gesellschaft zu fördern.