



Treibhausgase in der Atmosphäre

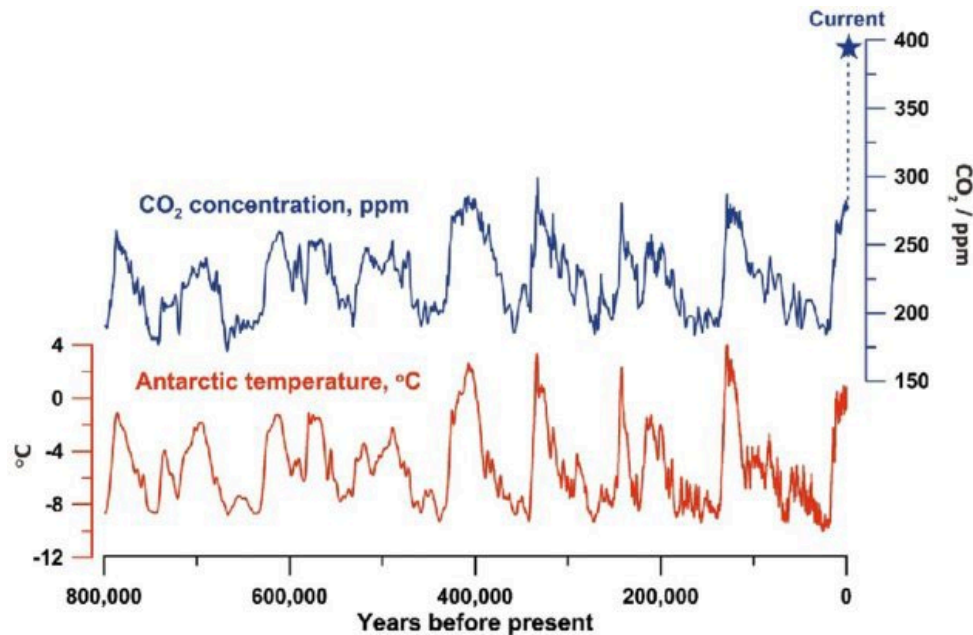
Int. Jost Bürgi Zukunftsforum 2022, Lichtensteig

Prof. Dr. Dominik Brunner
Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa
Departement Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich

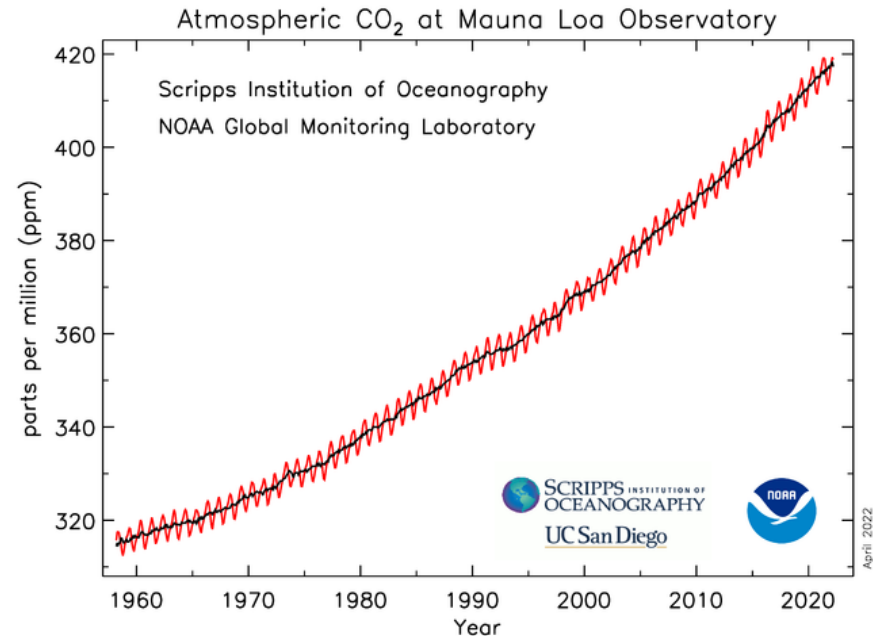
- Einleitung
 - Durch den Menschen verursachter Anstieg der Treibhausgase
 - Folgen für das globale Klima
- Was bestimmt die Entwicklung der Treibhausgase in der Atmosphäre?
- Wie werden Treibhausgas-Konzentrationen gemessen?
- Wie können wir aus solchen Messungen Emissionen bestimmen und warum ist das wichtig für das Pariser Klimaabkommen?
- Schlussfolgerungen und Ausblick

Entwicklung von CO₂ in den letzten 800'000 Jahren

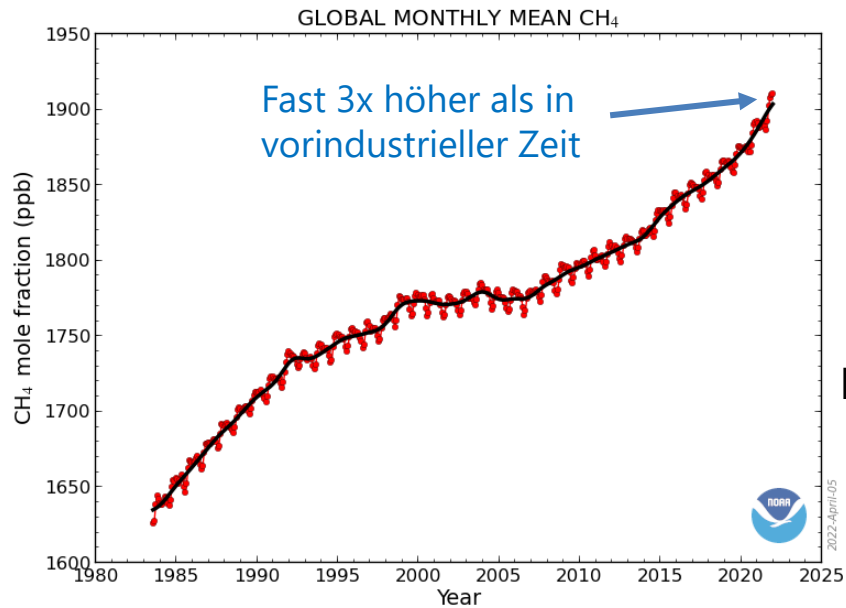
CO₂ während der letzten 800'000 Jahre
(rekonstruiert aus Eisbohrkernen in der Antarktis)



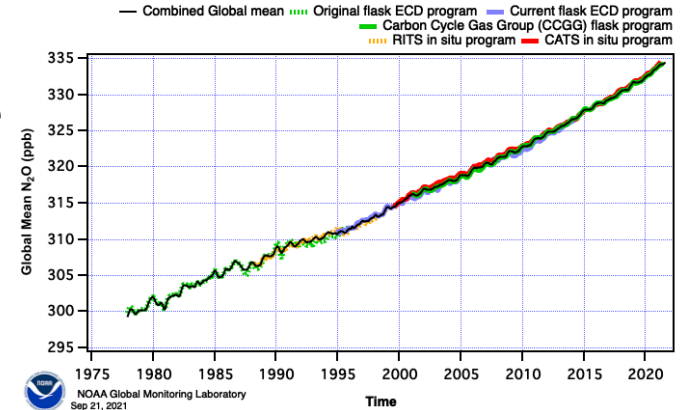
Anstieg von CO₂ seit 1960
(Messungen auf Mauna Loa, Hawaii)



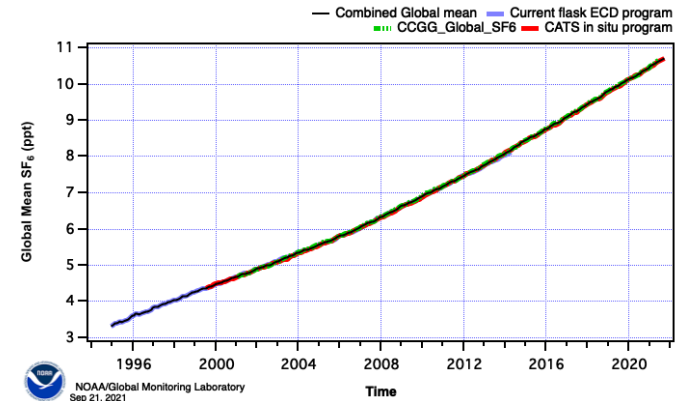
Methan (CH_4) 1984 – heute (Mittelwert über mehrere Stationen)



Lachgas (N_2O) 1987 - heute

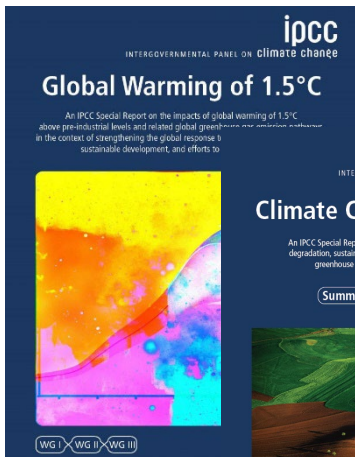


Schwefelhexafluorid (SF_6) 1995 - heute



Spezialberichte

Oktober 2018



August 2019



September 2019

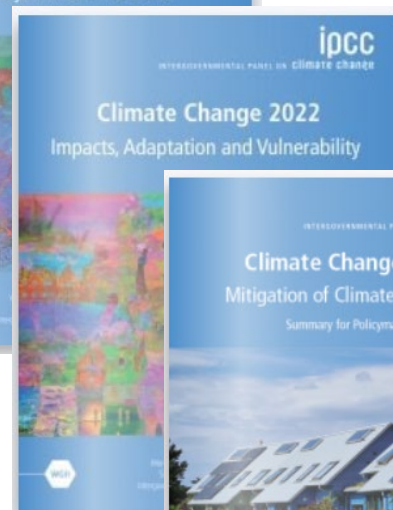


Hauptberichte

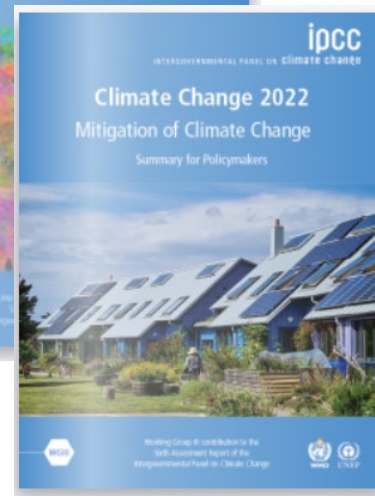
Physical Science Basis
August 2021, 3949 Seiten



Impacts, Adaptation and Vulnerability
Februar 2022, 3675 Seiten



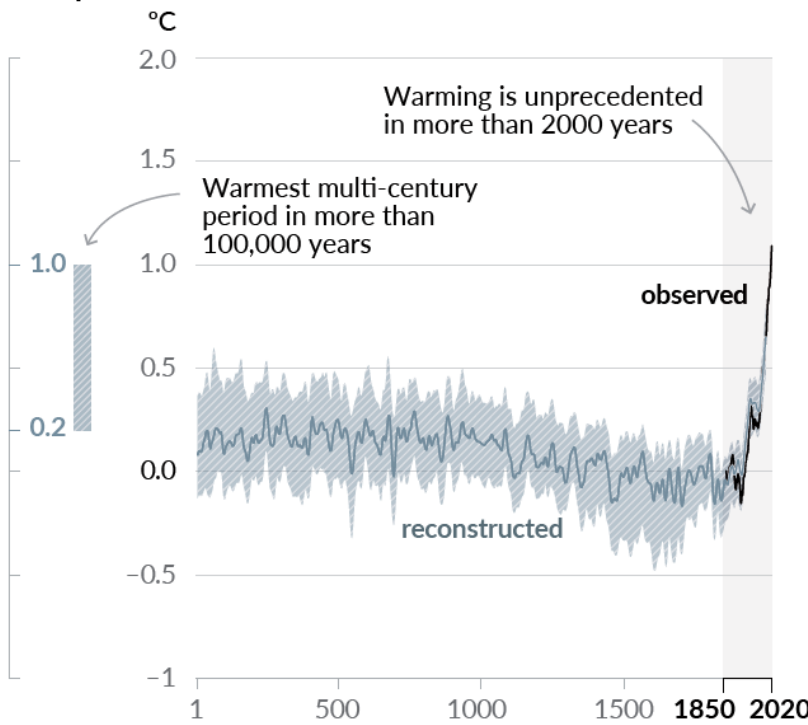
Mitigation of Climate Change
April 2022
2913 Seiten



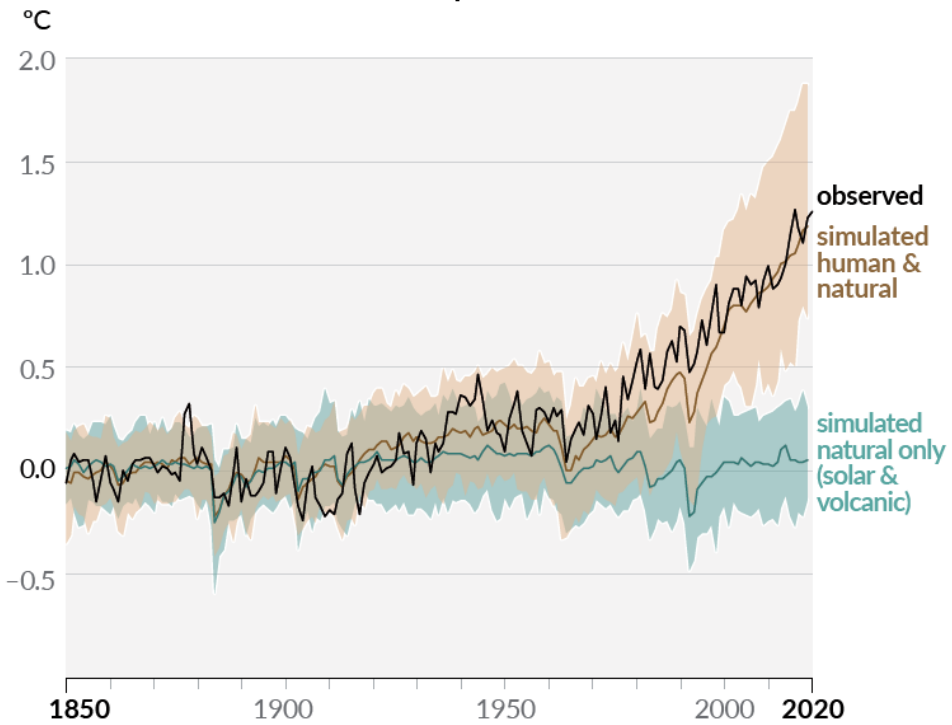


Klimaerwärmung als Folge des Anstiegs der Treibhausgase

Entwicklung der Erdoberflächen-Temperatur in den letzten 2000 Jahren

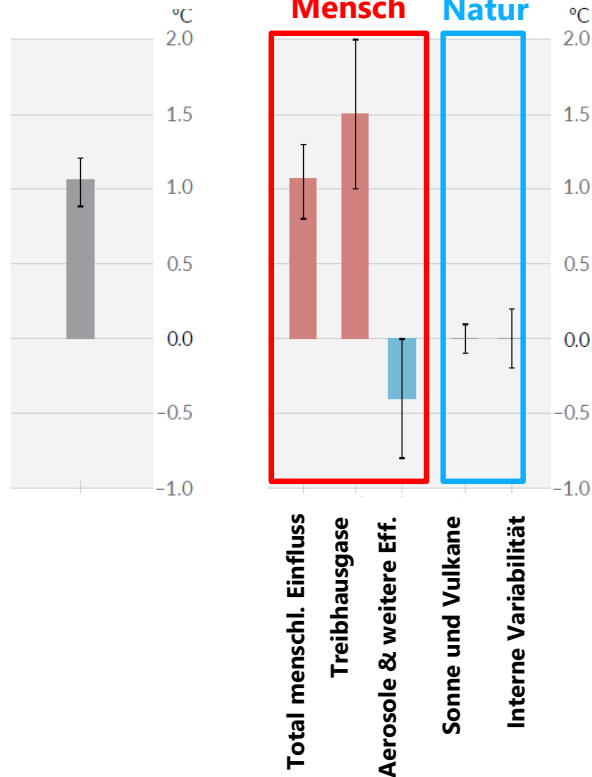


Entwicklung der beobachteten und modellierten Temperatur seit 1850



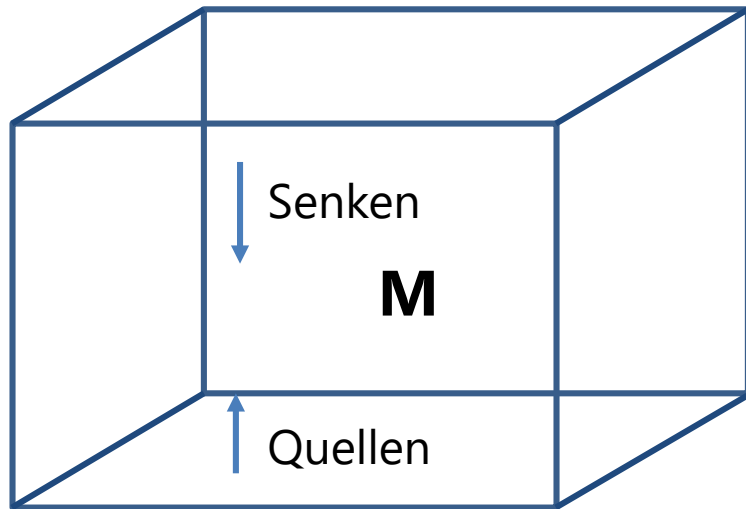
Klimaerwärmung als Folge der menschlichen Aktivitäten

Beobachtete
Erwärmung
2010-2019 relativ
zu 1850-1900



- Die globale Erwärmung seit vorindustrieller Zeit ist durch den Menschen verursacht
 - AR6 2021: «unequivocal» (ohne Zweifel)
 - AR5 2013: extremely likely
 - AR4 2007: very likely
 - AR3 2001: likely
- Der Temperaturanstieg ist viel grösser als die natürliche Variabilität des Klimas («internal variability»)
- Beiträge durch Veränderungen der Aktivität von Vulkanen und der Sonne sind für diesen Zeitraum vernachlässigbar

Was bestimmt die Entwicklung der Treibhausgase?



Gesamte Atmosphäre der Erde als Box

M sei die Gesamtmasse eines Treibhausgases (z.B. CO₂) in der Atmosphäre

Änderung der Masse von einem Jahr zum nächsten:

$$\mathbf{M}(\text{Jahr 2}) = \mathbf{M}(\text{Jahr 1}) + \text{Quellen} - \text{Senken}$$

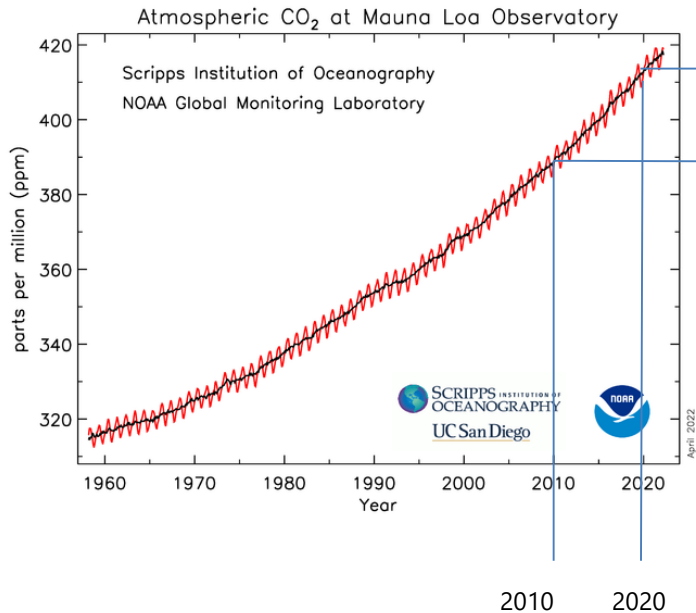
Quellen:

Emissionen (durch Mensch und Natur)

Senken:

Chemischer Abbau (wichtig bei CH₄) oder Aufnahme durch Ozeane und Pflanzen (wichtig bei CO₂)

Die Senken bestimmen die **Lebensdauer** des Treibhausgases. Senken sind oft proportional zu M.



Zunahme um ca. 25 ppm über 10 Jahre
= 2.5 ppm pro Jahr.

Wie viel ist das in Tonnen?

Gesamtmasse Atmosphäre:

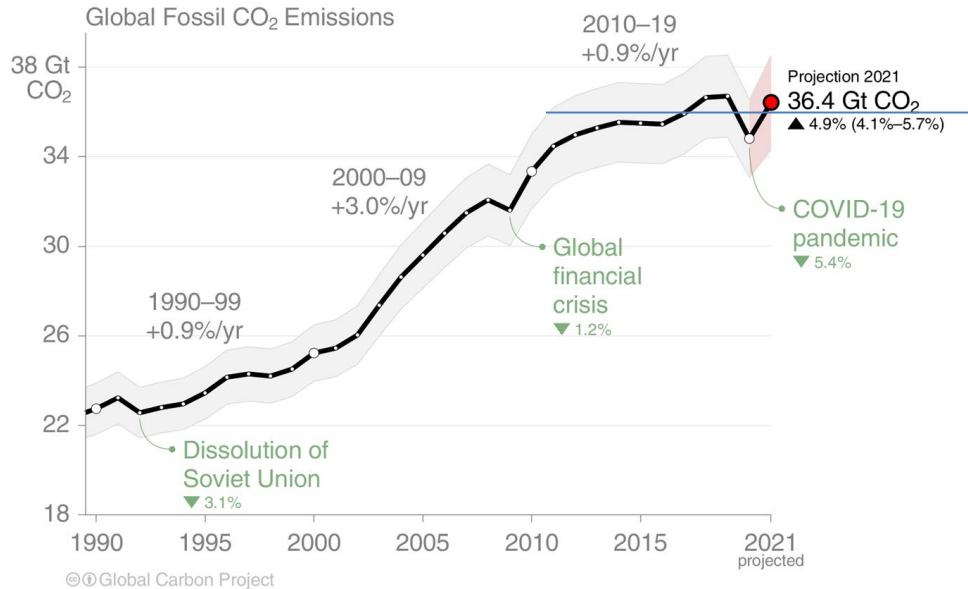
$$M_{\text{atm}} = 5.13 \times 10^{15} \text{ t}$$

Masse 1 ppm CO₂:

$$M_{1\text{ppm}(\text{CO}_2)} = M_{\text{atm}} / 10^6 \times 44/29 = 8.04 \times 10^9 \text{ t} \\ \approx 8 \text{ Gt (Gigatonnen)}$$

Über die letzten 10 Jahre war Zunahme also ca.
 $2.5 \times 8 \text{ Gt} = \mathbf{20 \text{ Gt pro Jahr}}$

Globale CO₂-Emissionen durch Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas) seit 1990



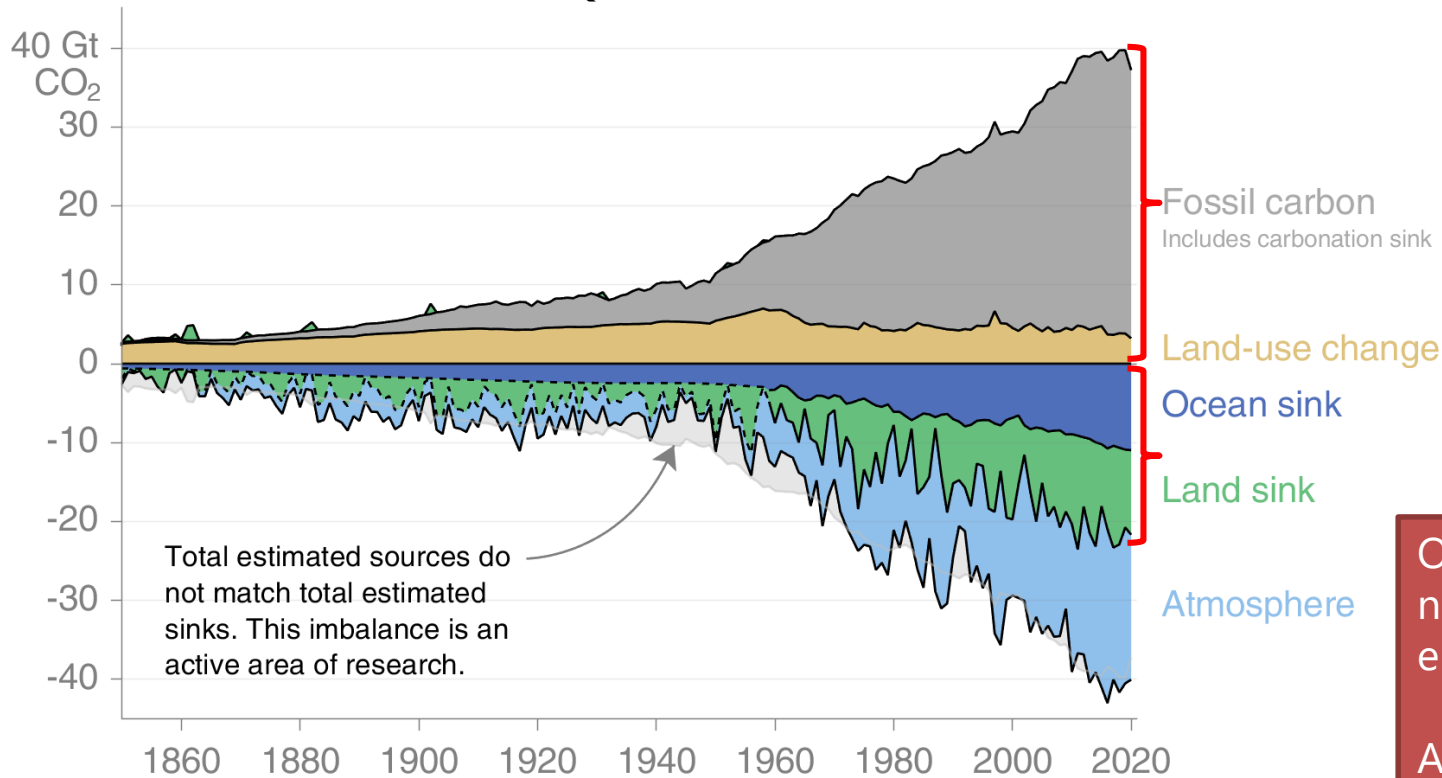
globalcarbonproject.org

ca. 36 Gt CO₂ pro Jahr

Aber Zunahme in Atmosphäre ist nur 20 Gt pro Jahr

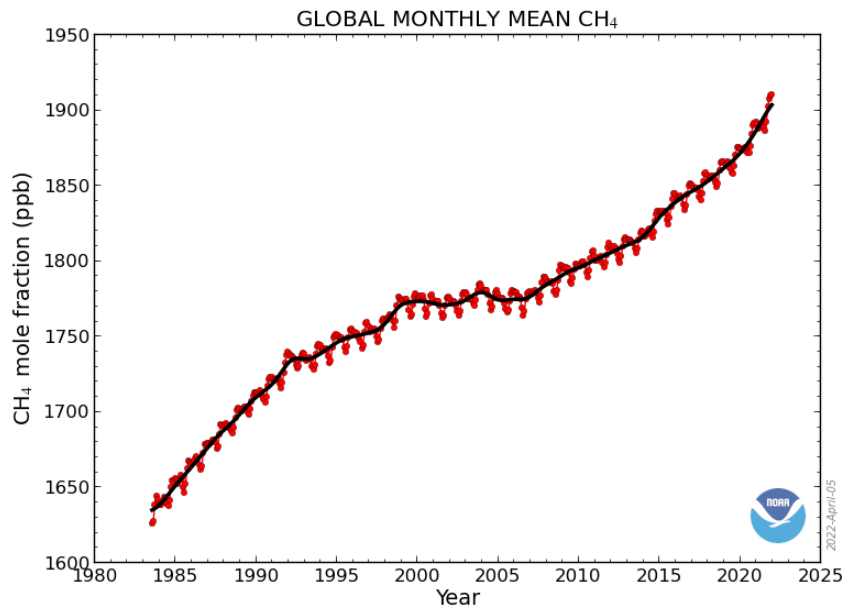
Was passiert mit dem Rest?

Balance zwischen Quellen und Senken



Ozeane und Pflanzen nehmen ca. 50% des emittierten CO₂ auf.

Auch in Zukunft??



Quellen durch menschliche Aktivität:

- Landwirtschaft (Wiederkäuer, Reis)
- Abfall (Deponien, Kläranlagen)
- Verluste bei Förderung und Transport von Kohle, Öl und Gas

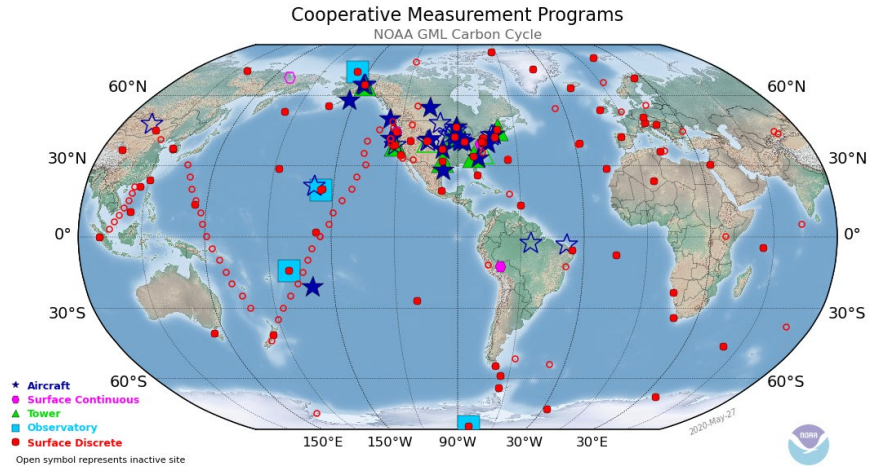
Senken:

- Chemischer Abbau durch das Hydroxylradikal OH
- Deposition am Boden

Lebensdauer von CH₄ ist nur 10 Jahre, viel kürzer als CO₂ (mehrere 100 Jahre).
Wenn wir heute CH₄ Emissionen stabilisieren, dann stabilisiert sich CH₄ innert 10 Jahren

Wie und wo werden Treibhausgase gemessen?

Globales Messnetz der US Behörde NOAA



- (2-)wöchentliche Flaschen-Proben
- Kontinuierliche Messungen
- Kontinuierlich von Messtürmen
- Wöchentliche Flugzeugprofile

Kalibration durch NOAA

Global Atmosphere Watch der World Meteorological Organization (WMO)

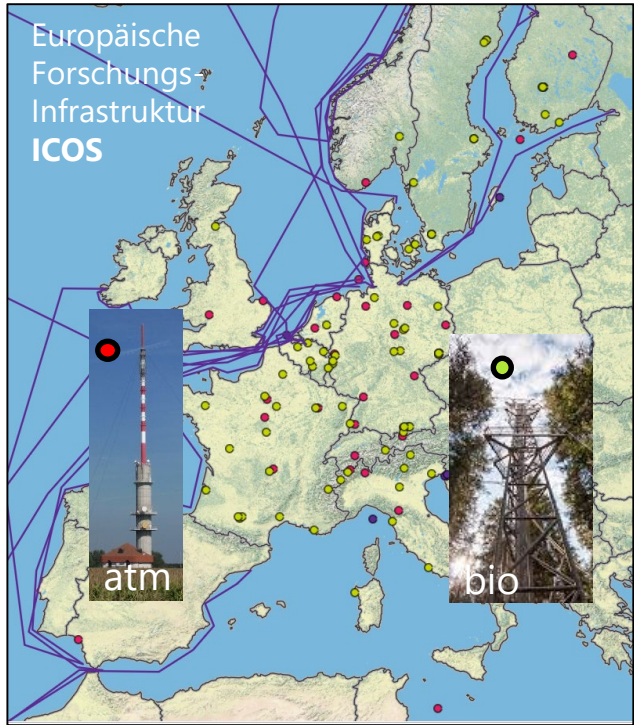


- Kontinuierliche Messungen

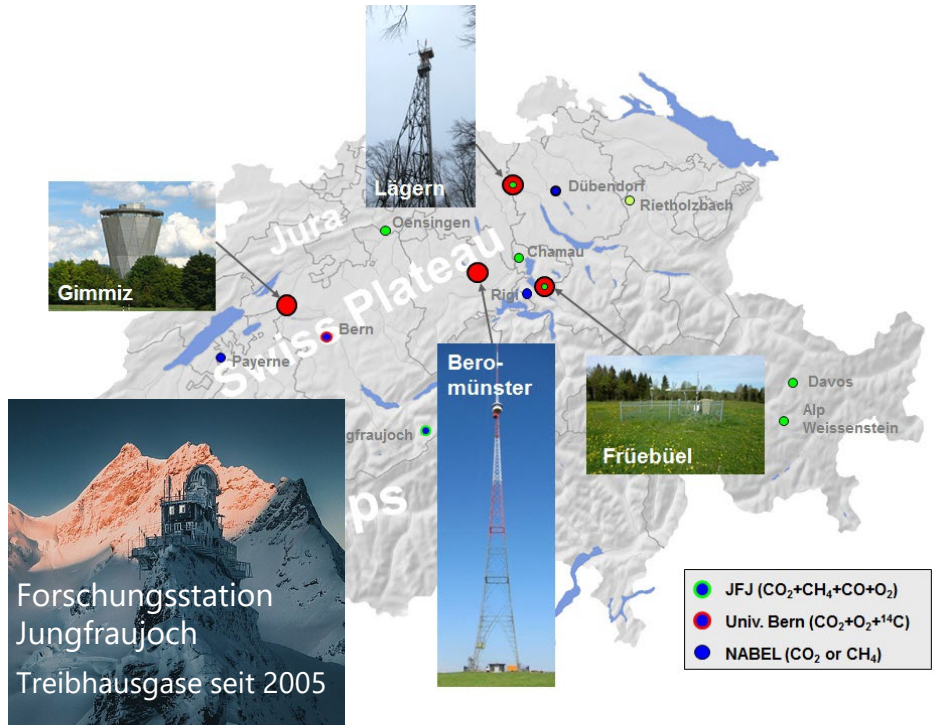


Kalibration und Qualitätskontrolle durch Empa

European Integrated Carbon Observation System ICOS

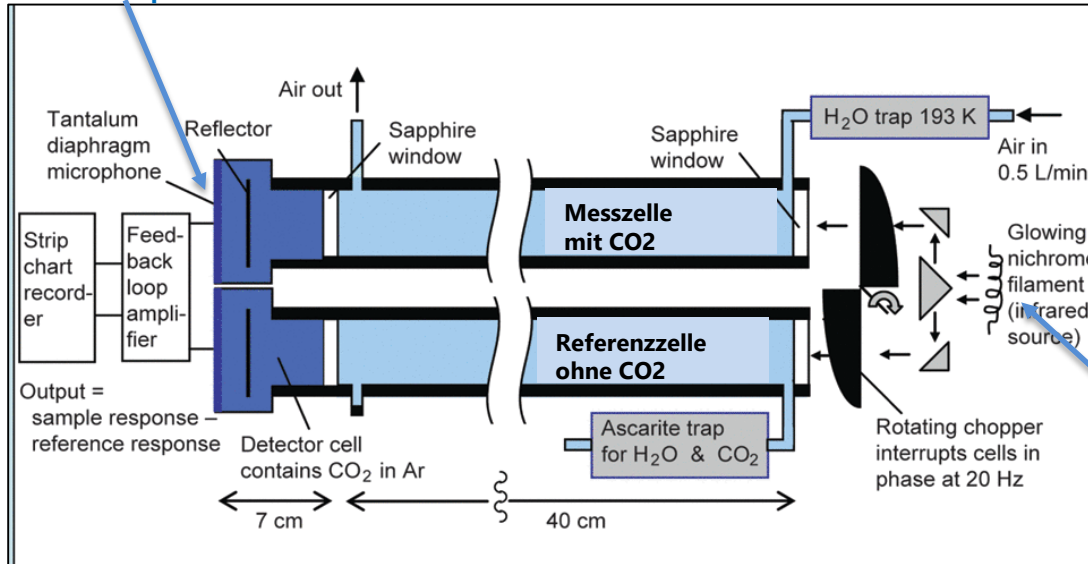


CarboCount Netzwerk seit 2012 CO₂ und CH₄, seit 2017 auch N₂O



CO₂ Instrument von Charles Keeling 1957 auf Mauna Loa installiert

Mikrofon



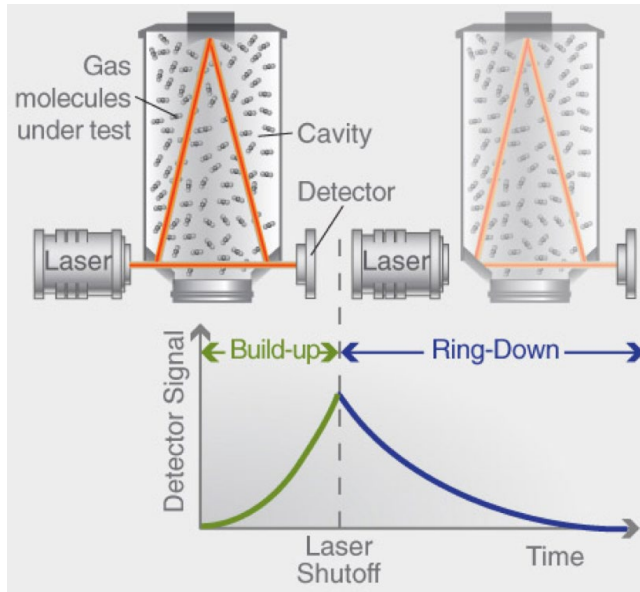
Absorption von Wärmestrahlung (IR) durch CO₂ führt zu Schwingungen einer Membran, die mit Mikrofonen gemessen wird.
Erste hochpräzise Messmethode!

Heizdraht als Quelle der Wärmestrahlung

Wie werden Treibhausgase gemessen?

CO₂ und CH₄ Messungen heute mittels Cavity-Ring-Down Spectroscopy (CRDS)

Marktführer
US Firma Picarro



Laserpuls wird in eine optische «Kavität» mit hoch reflektierenden Spiegeln geschickt.

Absorption durch CO₂ (oder CH₄) beeinflusst Abklingzeit des Laserpulses

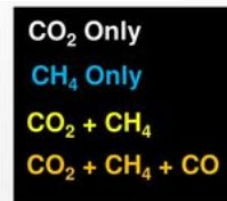


Empa Spin-off Firma MIRO
Multi-Komponenten Instrument



Messungen von CO₂ und CH₄ von Satelliten

Existierend



Geplant

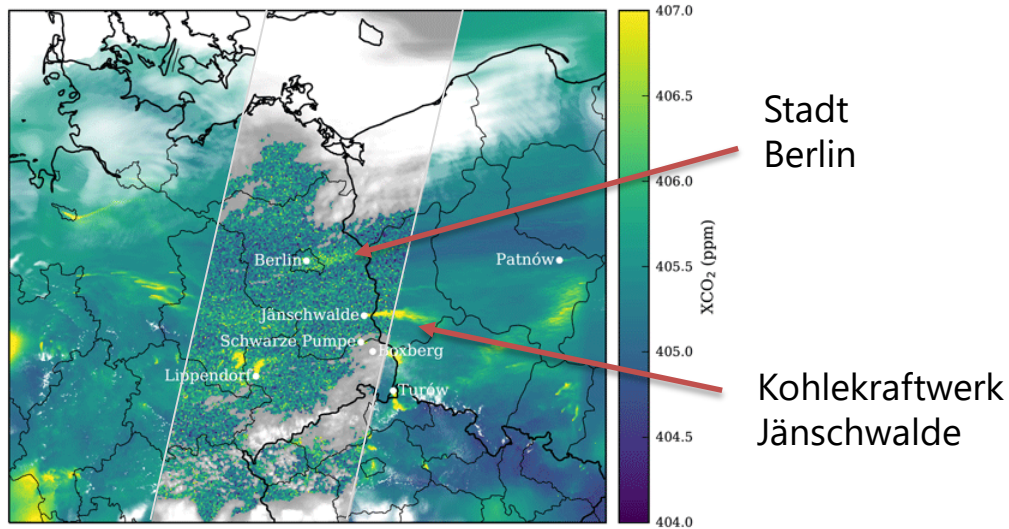




Copernicus CO₂ Monitoring Mission der EU

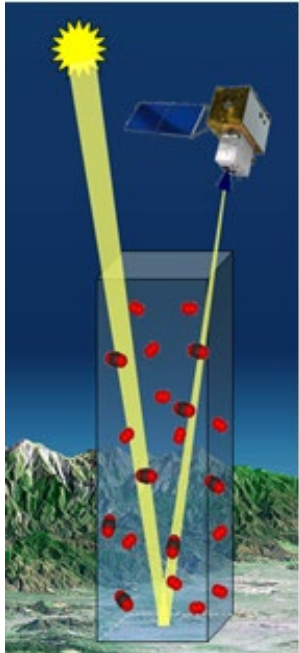
- Konstellation von 3 Satelliten für CO₂, CH₄, NO₂
- Erstmals Bilder mit hoher Auflösung (2 km x 2 km)
- Hohe Messgenauigkeit, ca. $\pm 0.1\%$

Simulierte CO₂-Messungen von CO2M

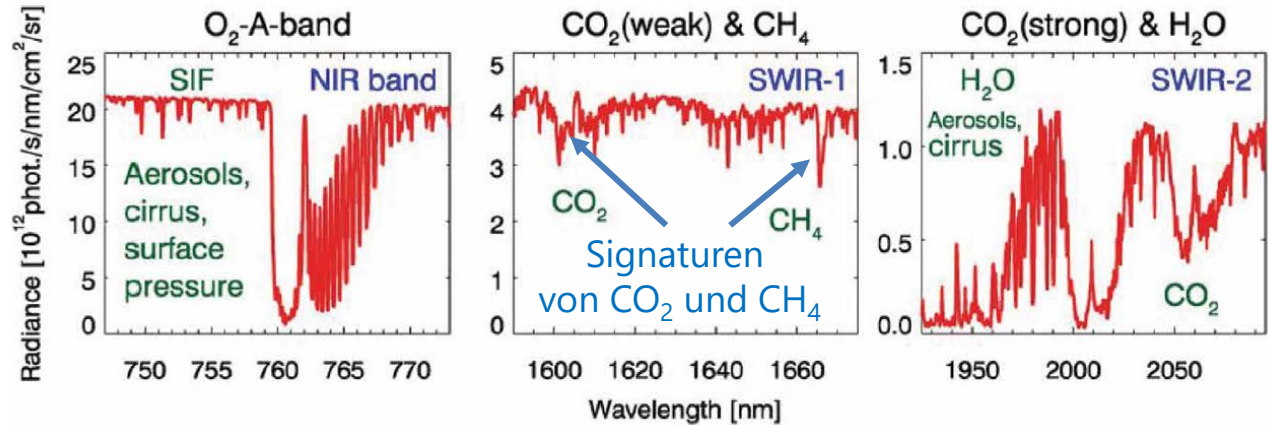


Wie werden CO₂ und CH₄ von Satelliten gemessen?

Messung von reflektiertem
Sonnenlicht im nahen Infrarot
(für Auge nicht sichtbar)



Absorption des Sonnenlichts durch CO₂ und Sauerstoff (O₂)
bei verschiedenen Wellenlängen (Farben) des Lichts



- Überwachung der Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen
- Besseres Prozessverständnis:
 - Welche Quellen und Senken sind wichtig?
 - Wie reagiert die Aufnahme von CO₂ durch die Pflanzen (oder Ozeane) auf Klimaveränderungen? In heißen Sommern wird weniger CO₂ gebunden.
 - Gibt es Lücken in unserem Wissen?
- Unabhängige Schätzung von Emissionen
(unabhängig von den Zahlen, die Ländern rapportierten)

Warum ist eine unabhängige Schätzung von Emissionen wichtig?

Internationale Abkommen

Klima



Städte-
Initiativen

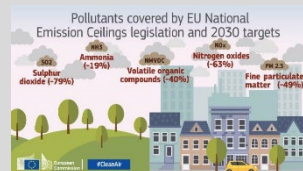
- Länder sind verpflichtet, ihre Emissionen zu erfassen und zu rapportieren.
- Emissionen werden mit statistischen Methoden erhoben: Aktivitäten (z.B. gefahrene Kilometer pro Jahr) multipliziert mit Emissionsfaktoren (z.B. Emission pro km)

Schutz der Ozonschicht



- Diese Erhebungen sind unsicher und fehleranfällig.

Luftqualität



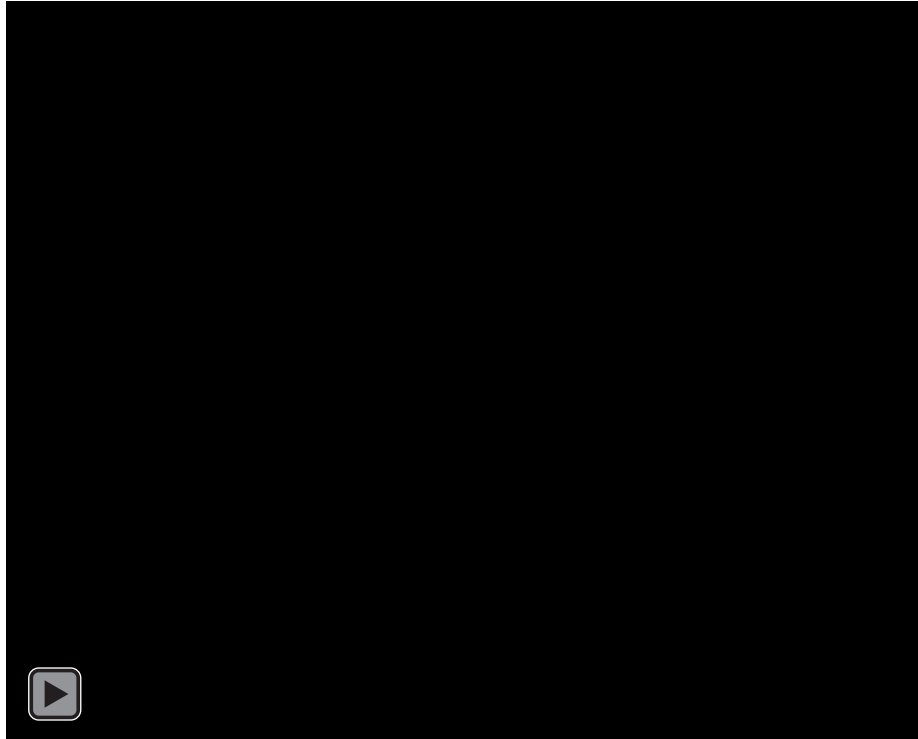
- **Unabhängige Schätzung von Emissionen aus Messungen deshalb wichtig, «Die Atmosphäre lügt nicht»**

Messungen von Treibhausgas-Konzentrationen



+

Atmosphärisches Transportmodell, das berechnet, welche Emissionen in der Umgebung eine Messung beeinflussen



+

Mathematisches Optimierungs-Verfahren

$$J = \frac{1}{2} \underbrace{(Mx - y)^T S_o^{-1} (Mx - y)}_{\text{misfit model - observations}} + \frac{1}{2} \underbrace{(x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a)}_{\text{deviation from a-priori}}$$




Geschätzte Emissionen

Anteil einzelner Gase zu den gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz (2016)

Switzerland's
Greenhouse Gas Inventory
1990–2020

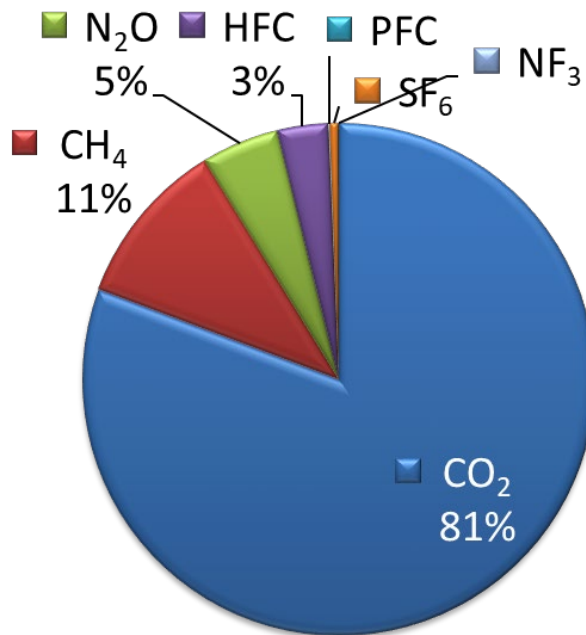
National Inventory Report
Including reporting elements under the Kyoto Protocol

Submission of April 2022
under the United Nations Framework Convention on Climate Change
and under the Kyoto Protocol

 Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

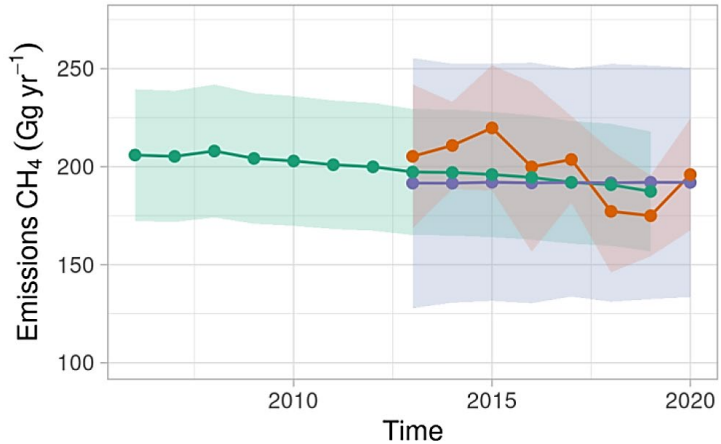
Federal Office for the Environment FOEN



100% = 49'414 CO₂ Äquivalente (kt)

Unabhängige Schätzung von Emissionen für die Schweiz

Methan



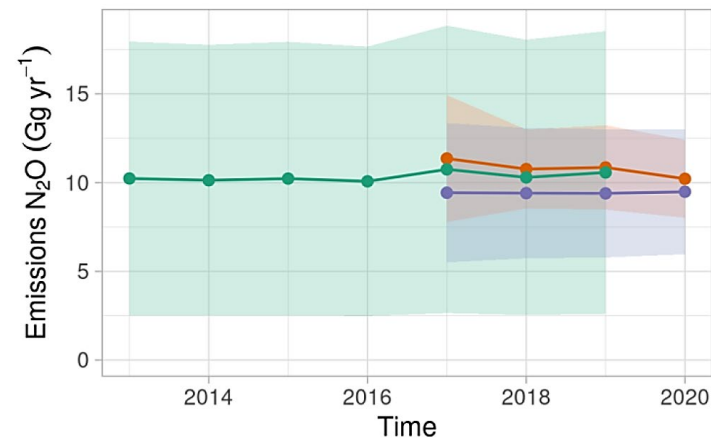
Inventar

- NIR
- posterior
- prior

Empa Schätzung

Jährlich publiziert in Anhang des Nationalen Treibhausgasinventars der Schweiz

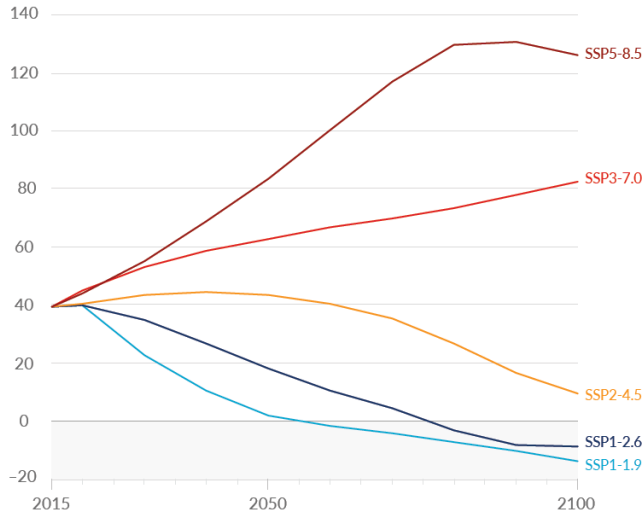
Lachgas



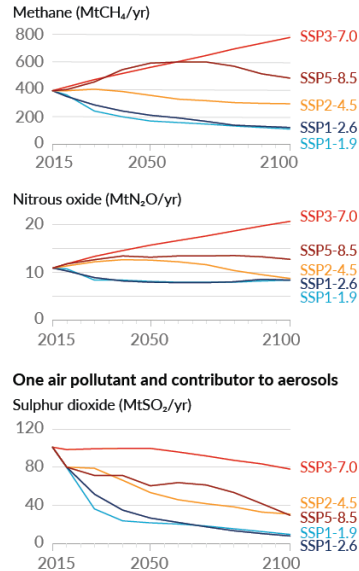
- NIR
- posterior
- prior

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen in 5 repräsentativen Szenarien

Carbon dioxide (GtCO₂/yr)



Selected contributors to non-CO₂ GHGs



- Für das 1.5°C Ziel müssen CO₂-Emissionen bis 2050 auf Null sinken, dann negativ
- Praktisch ausser Reichweite, 1.5° schon kurz nach 2030 erreicht
- Auch 2°C Ziel erfordert drastische Reduktion
- 2°C global bedeutet 3-4° Anstieg in der Schweiz
- In Szenarien mit weiter hohen CO₂-Emissionen sinkt Kapazität der Biosphäre und Ozeane, CO₂ zu binden, was CO₂-Anstieg beschleunigt

An aerial photograph of a Swiss town, likely Lucerne, showing a dense cluster of white buildings with red-tiled roofs. The town is surrounded by lush green trees and a river. The text "Vielen Dank für die Aufmerksamkeit" is overlaid in the center of the image.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit