

Inhalt

Hintergrundinformationen	1
Wie Satelliten CO ₂ messen und die Rolle von Absorptionslinien	1
Der OCO-2-Satellit	4
Messung und Simulation von CO ₂ -Konzentrationen.....	5
Erklärungen zum interaktiven Karten-Material	6
Auswählbare Satellitenmessungen	7
Fitstrategie.....	8
Weiterführende Informationen	8
Referenzen & weiterführende Literatur	9

Hintergrundinformationen

CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und hauptverantwortlich für den momentan stattfindenden Klimawandel [1, *Figure SPM.2*]. Hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger stieg die atmosphärische CO₂-Konzentration seit der industriellen Revolution [1, *A1.1.1*]. Da CO₂ in der Atmosphäre chemisch sehr stabil ist, befinden sich seine Quellen und Senken nahezu ausschließlich an der Erdoberfläche. Es gibt jedoch große Unsicherheiten, wer genau wie viel CO₂ emittiert und auch, wo genau wie viel CO₂ von der Biosphäre aufgenommen wird. Satellitenmessungen können dazu beitragen, die anthropogenen Emissionen grenzübergreifend zu beobachten und die Einhaltung beschlossener Emissionsminderungsmaßnahmen zu überprüfen und Klimaprognosen zu ermöglichen.

Wie Satelliten CO₂ messen und die Rolle von Absorptionslinien

Satelliten verrichten ihre Arbeit im Weltall außerhalb der Erdatmosphäre. Dabei messen Satelliteninstrumente elektromagnetische Strahlung - Licht. Im Fall von CO₂-Messungen handelt es sich dabei um Sonnenlicht, welches an der Erdoberfläche oder innerhalb der Atmosphäre reflektiert wird (Abbildung 1).

Zerlegt man das weiße Sonnenlicht z. B. mit einem Beugungsprisma in seine spektralen Bestandteile, erkennt man, dass es aus vielen Farben (Wellenlängen) besteht (Abbildung 2, links, [4]). Das Licht wird dabei noch weiter gebrochen, als mit dem menschlichen Auge sichtbar ist: UV-Strahlung hat kürzere und Infrarot-Strahlung längere Wellenlängen, als wir Menschen sehen können.

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

1814 entdeckte der deutsche Physiker und Optiker Joseph von Fraunhofer [5] dunkle Linien im Spektrum des Sonnenlichtes, die nach ihm benannten Fraunhoferlinien (Abbildung 2, rechts, [6]). Später fand man heraus, dass einige dieser Linien dadurch hervorgerufen werden, dass Gase in der Erdatmosphäre Teile des Sonnenlichtes absorbieren, wobei die Position der Absorptionslinien [7] spezifisch für die absorbierenden Gase sind, und auch in nicht-sichtbaren Bereichen des Lichts auftreten [8].

CO₂ ist im sichtbaren Spektralbereich transparent, im nah- und thermisch-infraroten Spektralbereich absorbiert es jedoch auf vielen Wellenlängen. Die Absorptionslinien treten in Gruppen, sogenannten Linienbanden, auf und sind im thermisch-infraroten Spektralbereich sehr stark. CO₂ ist hier also recht undurchlässig für das Licht und erschwert so, dass die von der Erdoberfläche und der Atmosphäre abgegebene Wärmestrahlung in den Weltraum entweichen kann (die von der Sonne abgegebene Infrarotstrahlung spielt in diesem Zusammenhang übrigens keine Rolle). Diese starken Absorptionslinien sind der Grund dafür, dass CO₂ ein effizientes Treibhausgas [9] ist.

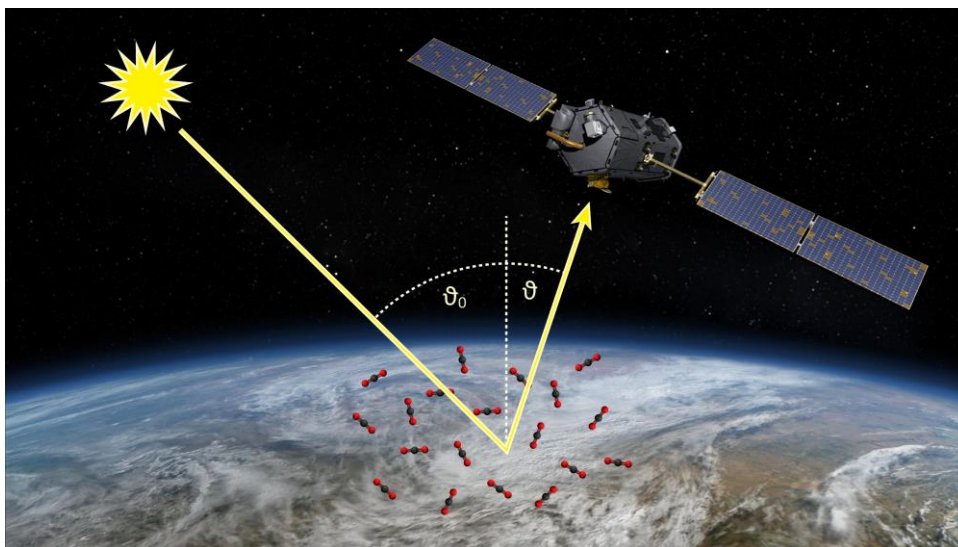


Abbildung 1: Beobachtungsgeometrie des OCO-2 Satelliten der NASA: Sonnenlicht wird am Boden und zu kleinen Teilen in der Atmosphäre reflektiert und dann vom Satelliten spektroskopisch analysiert. Die rot-schwarz-roten Teilchen symbolisieren CO₂-Moleküle, die Teil der Erdatmosphäre sind und die Teile des Sonnenlichtes absorbieren. Quelle Satellit und Hintergrund: https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Orbiting_Carbon_Observatory-2_artist_rendering_%28PIA18374%29.jpg; Quelle CO₂-Moleküle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_3D_ball.png

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

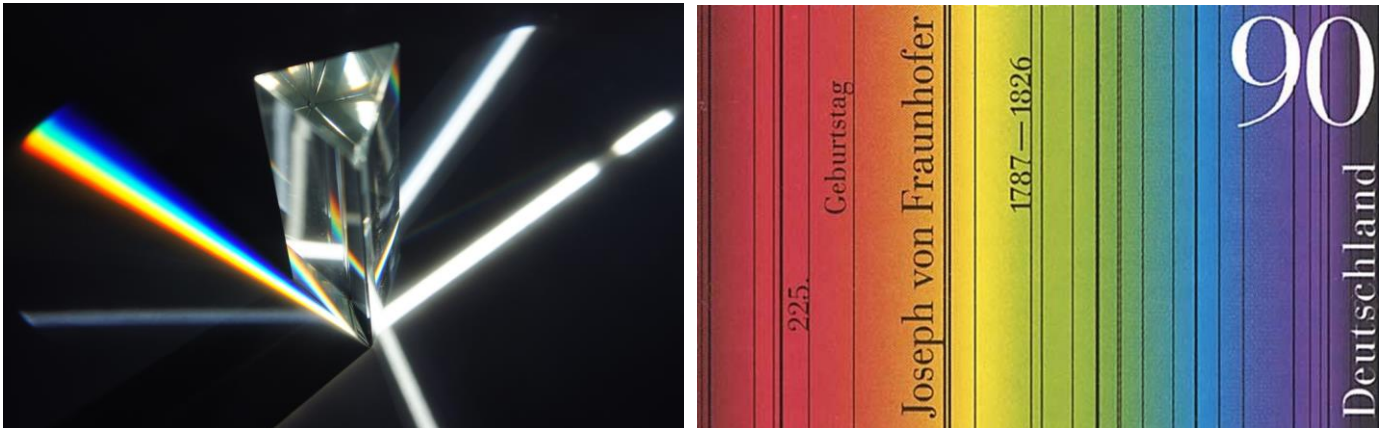


Abbildung 2: Sonnenlicht wird in einem Beugungsprisma in seine spektralen Bestandteile aufgespalten (links, Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_prism.png). Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum dargestellt auf einer 90 Cent Briefmarke der Deutschen Post zum 225. Geburtstag Joseph von Fraunhofers (rechts, Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:DPAG_2012_Fraunhofer.jpg).

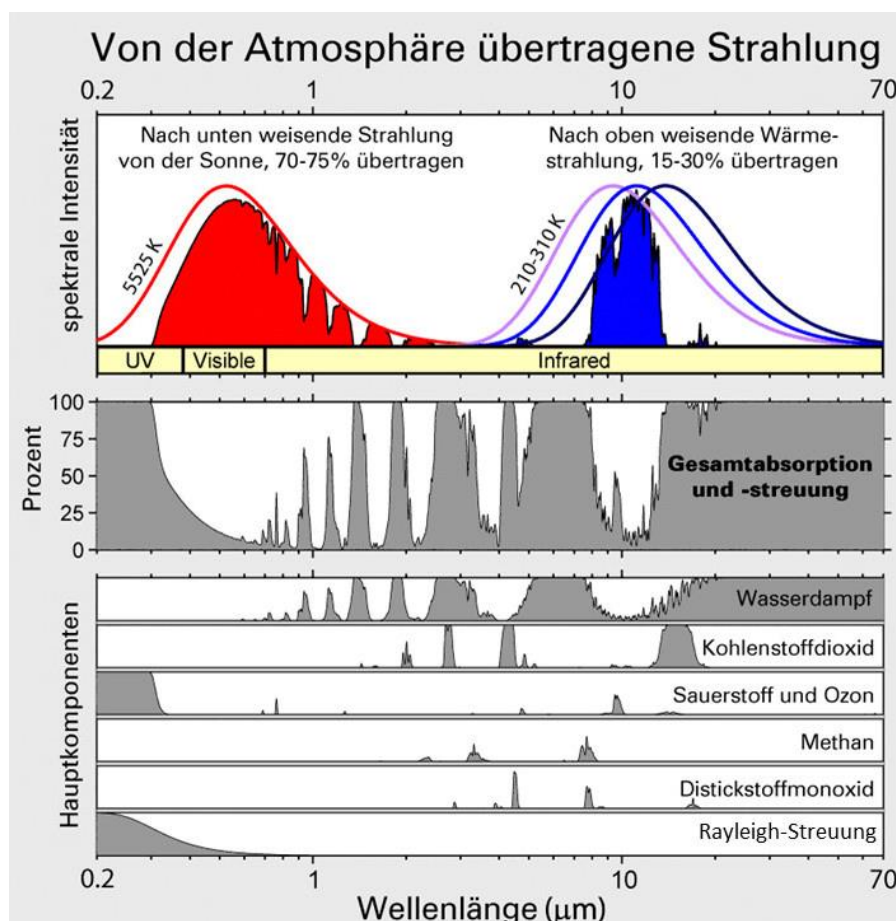


Abbildung 3: Von der Atmosphäre übertragene Strahlung als Funktion der Wellenlänge. Oben: Kurzwellige Sonnenstrahlung in Rot und langwellige Wärmestrahlung in Blau. Mitte: Anteil absorbierter Strahlung. Unten: Komponenten der absorbierten Strahlung unter anderem mit CO₂ und H₂O. Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Idealisiertes_Treibhausmodell#/media/Datei:Atmospheric_Transmission_de.png.

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

Der OCO-2-Satellit

Das primäre Missionsziel des OCO-2 (*Orbiting Carbon Observatory-2*, [11])-Satelliten der NASA ist es, die atmosphärische CO₂-Konzentration mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, um neues Wissen über die Quellen und Senken von CO₂ in Erfahrung zu bringen. Zu diesem Zweck misst OCO-2 das vom Erdboden und der Atmosphäre reflektierte Sonnenlicht in drei Spektralbändern im nah-infraroten Spektralbereich: ein Sauerstoff-Absorptionsband bei etwa 760 nm und zwei CO₂-Absorptionsbänder bei etwa 1600 nm bzw. 2050 nm. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel einer solchen Spektralmessung von OCO-2 mit hoher spektraler Auflösung, in der man die einzelnen Linien der Spektralbänder erkennen kann.

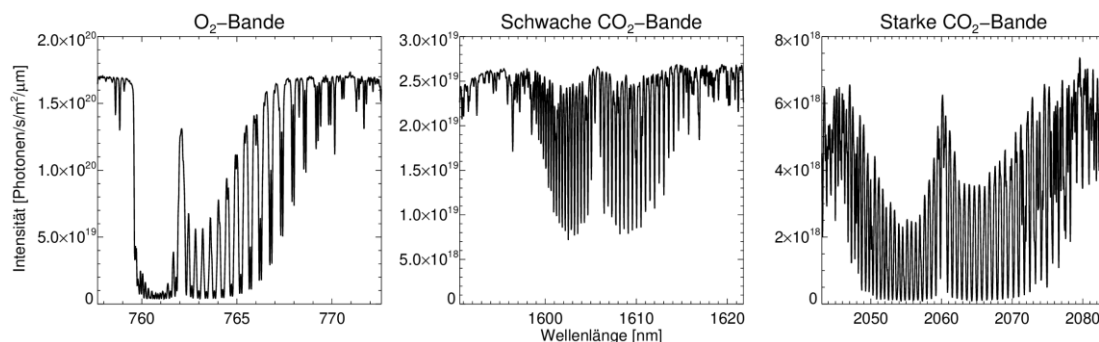


Abbildung 4: Beispiel einer Messung des OCO-2 Satelliten der NASA vom 11.02.2021. Links: O₂-Bande. Mitte: schwache CO₂-Bande. Rechts: starke CO₂-Bande. Quelle der OCO-2-Daten: NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center [12].

Satellitenbeobachtung des CO₂-Anstiegs:

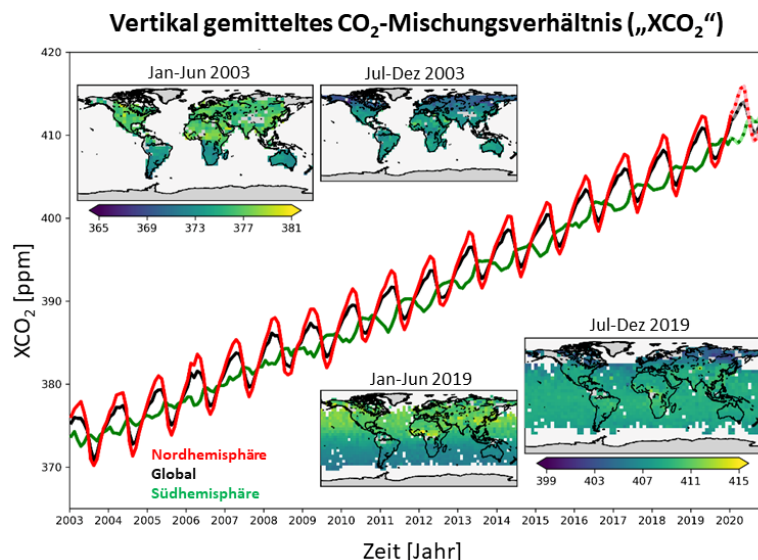


Abbildung 5: Zeitreihen und globale Karten von CO₂-Satellitenmessungen. Dargestellt ist das (vertikal gemittelte) atmosphärische Mischungsverhältnis von CO₂ in ppm. Klar zu erkennen ist der Anstieg des CO₂ aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie die jahreszeitlichen Schwankungen des CO₂ aufgrund der Aufnahme und Abgabe durch Pflanzen innerhalb eines jeden Jahre durch Pflanzenwachstum und Pflanzenatmung sowie Zersetzung absterbender Pflanzenreste. Quelle: https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/indicators/ghg_concentrations/C3S_indicators_ghg_concentrations_fig2_April21_branded.pdf

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

Messung und Simulation von CO₂-Konzentrationen

CO₂ ist chemisch sehr stabil und die Aufnahme durch die Biosphäre und die Ozeane erfolgt recht langsam. Daher verbleibt einmal emittiertes CO₂ meist hunderte von Jahren in der Atmosphäre und reichert sich dort an. Diesen Anstieg kann man, wie auch die räumliche Verteilung, von Satelliten aus messen (Abbildung 5).

Da sich mittlerweile viel CO₂ in der Atmosphäre befindet, verursachen auch starke Quellen, wie Großstädte, nur geringe lokale Erhöhungen der atmosphärischen Konzentration. Um die Quellen trotzdem genau zu bestimmen, müssen Messungen und Auswerteverfahren der atmosphärischen Konzentration im Bereich weniger Promille genau sein. Die Strahlungsmessungen des OCO-2-Satelliten der NASA sind bei günstigen Bedingungen auf weniger als ein Promille genau.

Um mit Hilfe von Satellitenmessungen die CO₂-Konzentration herauszufinden, wird versucht, die Messung bestmöglich durch eine Simulation zu erklären. Für diese benötigt man nicht nur bekannte Eingangsgrößen wie den Sonnenzenith- und Satellitenzenithwinkel (Abbildung 1), sondern auch unbekannte Größen wie den Reflexionsgrad (Albedo) des Erdbodens, den Wasserdampfgehalt und insbesondere die CO₂-Konzentration.

Für die erste Simulation werden alle unbekannten Größen zunächst auf plausible, aber geratene Werte gesetzt. Danach werden die unbekannten Eingangsparameter der Simulation so lange verändert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Spektrum erreicht wird. Die auf diese Weise bestimmte CO₂-Konzentration kann dann als wahre CO₂-Konzentration angenommen werden.

Für die Auswertung großer Mengen echter Satellitendaten ist dieser hochkomplexe Prozess automatisiert (z. B. [13]). Die hier vorgestellte interaktive Grafik berücksichtigt zumindest wesentliche Aspekte der Strahlungsübertragung in der Atmosphäre, so dass am Beispiel der satellitengestützten Fernerkundung von CO₂ die Grundzüge der differentiellen optischen Absorptionsspektroskopie verdeutlicht werden können [14, 15].

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

Erklärungen zum interaktiven Karten-Material

Zur Erarbeitung der Lernziele steht den Nutzer:innen eine interaktive browserbasierte Grafik zur Verfügung, die es ihnen ermöglicht, herauszufinden, wie man vom Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration bestimmen kann (Abbildung 6). Das Tool ist unter https://www.iup.uni-bremen.de/carbon_ghg/Clim4Edu/interaktiv/Was_zeigen_uns_Satelliten_CO2_Beobachtungen.html abrufbar.

In der interaktiven Grafik stehen fünf verschiedene Messungen zur Verfügung, die über eine Schaltfläche ausgewählt werden können und die Eingangsparameter der Simulation lassen sich durch Schieberegler verändern. Um genaue Ergebnisse gewährleisten zu können, gibt es ein *Hovertool*, mit dem Wellenlänge und Reflexionsgrad der Simulation abgelesen werden können. Außerdem enthält die interaktive Grafik als Hilfestellung eine Anzeige der erzielten Fitqualität (rot = schlecht, grün = gut).

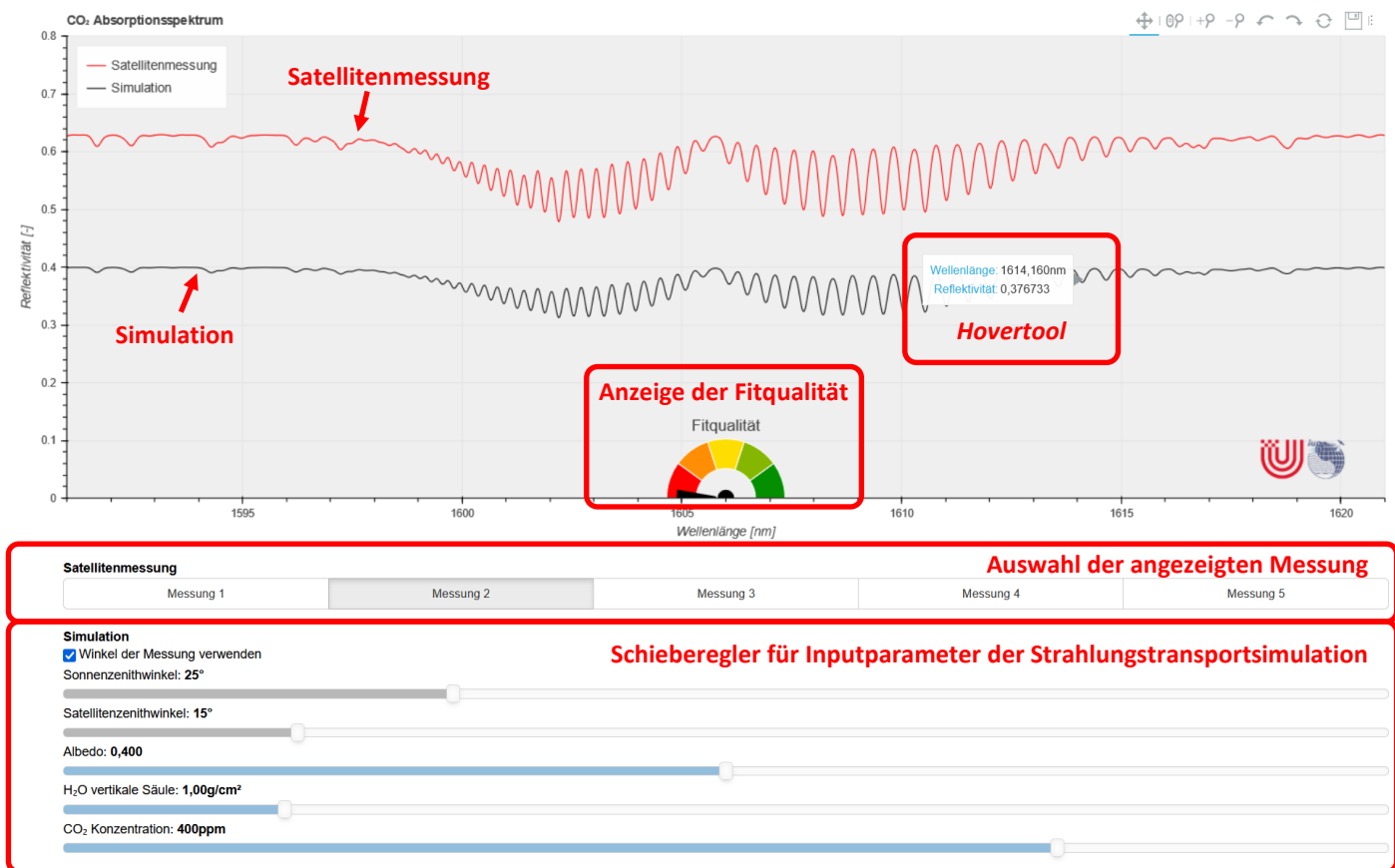


Abbildung 6: Beispielsicht der interaktiven Grafik zur Bestimmung der atmosphärischen CO₂-Konzentration mit Hilfe satellitengestützter Fernerkundung.

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

Ein Reflexionsspektrum beschreibt den von der Wellenlänge (x-Achse) abhängigen Reflexionsgrad (y-Achse). Dieser ist 1, wenn das von der Erde (inklusive Atmosphäre) reflektierte Licht einen maximalen Wert erreicht, und 0, wenn kein Licht von der Erde (inklusive Atmosphäre) reflektiert wird. Je näher die Linie bei einer bestimmten Wellenlänge bei 0 liegt, desto weniger Licht dieser Wellenlänge wird reflektiert. Je mehr CO₂ in der Luft ist und je länger der Lichtweg durch die Atmosphäre ist, desto tiefer liegen die Linien im Bereich der CO₂-Absorptionsbereiche. Die Länge des Weges durch die Atmosphäre ist über die Winkel des einfallenden Sonnenlichts und des reflektierten Lichts, das den Satelliten erreicht, bestimmt.

Auswählbare Satellitenmessungen

Messung 1 basiert auf einer Simulation mit $\vartheta_0=50^\circ$; $\vartheta=20^\circ$; $\alpha=0,33$; $H_2O=1,9\text{ g/cm}^2$ und $CO_2=422\text{ ppm}$. Mit einer relativ hohen CO₂-Konzentration, einer moderaten Albedo und Wasserdampfsäule und einer relativ tief stehenden Sonne, könnte dieses Spektrum einer über Deutschland gemachten Satellitenmessung ähneln.

Messung 2 basiert auf einer Simulation mit $\vartheta_0=25^\circ$; $\vartheta=15^\circ$; $\alpha=0,63$; $H_2O=1,4\text{ g/cm}^2$ und $CO_2=412\text{ ppm}$. Aufgrund der großen Albedo, der geringen Wasserdampfsäule und der hochstehenden Sonne, könnte dieses Spektrum einer über der Sahara gemachten Satellitenmessung ähneln.

Messung 3 basiert auf einer Simulation mit $\vartheta_0=40^\circ$; $\vartheta=30^\circ$; $\alpha=0,27$; $H_2O=4,6\text{ g/cm}^2$ und $CO_2=396\text{ ppm}$. Die sehr große Wasserdampfsäule, die für die Simulation dieser Messung verwendet wurde, würde man vor allem für Satellitenmessungen in tropischen Gebieten vermuten.

Messung 4 basiert auf einer Simulation mit $\vartheta_0=45^\circ$; $\vartheta=25^\circ$; $\alpha=0,54$; $H_2O=0,4\text{ g/cm}^2$ und $CO_2=261\text{ ppm}$. Diese simulierte Messung verdeutlicht, wie sich unerkannte Wolken auf die ermittelte CO₂-Konzentration auswirken können. Optisch dicke Wasserwolken haben bei einer Wellenlänge von 1600 nm eine relativ hohe Albedo und können den unteren Teil der Atmosphäre abschirmen, so dass sich der Lichtweg zum Satelliten verkürzt. Als Folge daraus werden die CO₂-Absorptionslinien weniger tief, was als scheinbar geringere CO₂-Konzentration fehlinterpretiert werden kann.

Messung 5 basiert auf einer echten Messung des OCO-2 Satelliten vom 11.02.2021; 168,57°W; 18,9115°N über dem Pazifik. Sonnenzenith- und Satellitenzenithwinkel betrugen $\vartheta_0=14^\circ$ bzw. $\vartheta=19^\circ$. Mit den Eingangsparametern $\alpha=0,33$; $H_2O=1,9\text{ g/cm}^2$ und $CO_2=422\text{ ppm}$ erhält man die bestmögliche Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation, allerdings erkennt man schnell, dass es noch signifikante Unterschiede gibt. Diese sind auf die sehr stark vereinfachte Simulation und zum kleinen Teil auch auf das Rauschen der Messung zurückzuführen.

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

Fitstrategie

Um eine möglichst gute Übereinstimmung zu erzielen kann man folgende Strategie anwenden:

1. Man stellt die Albedo so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den absorptionsfreien Bereichen (z. B. bei 1595,5 nm und 1620,0 nm) entsteht.
2. Man stellt die CO₂-Konzentration so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den nicht von Wasser beeinflussten Absorptionslinien (z.B. bei 1600,36 nm und 1610,06 nm) entsteht.
3. Man stellt die Wasserdampfsäule so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den Bereichen starker Absorption durch Wasserdampf entsteht (z. B. bei 1594,30 nm, 1602,12 nm und 1613,40 nm).
4. Man prüft, dass jede minimale Verstellung einer der drei Parameter zu einer schlechteren Fitqualität führt. Ist dies nicht der Fall beginnt man wieder bei 1.

Weiterführende Informationen

Die interaktive Grafik basiert auf Spektren der effektiven absorptions-optischen Dicke von CO₂ und H₂O im infraroten Bereich um 1600 nm sowie einem Reflexionsspektrum, das mit dem OCO-2 Satelliten gemessen wurde und vom NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center [12] stammt.

Mit dem Strahlungstransportprogramm SCIATRAN der Universität Bremen wurden Transmissionsspektren für eine typische CO₂-Konzentration (400 ppm) und einen typischen Wasserdampfgehalt (2 g/cm²) für eine Satellitenbeobachtungsgeometrie bestimmt. Diese Spektren wurden mit einem Gaußschen Kernel (Halbwertsbreite 0.2 nm) gefaltet, um die effektive absorptions-optische Dicke für 1 ppm CO₂ bzw. 1 g/cm² H₂O zu berechnen.

Das OCO-2-Intensitätsspektrum wurde zu einem Reflexionsspektrum approximiert, indem es durch ein synthetisches Sonnenspektrum geteilt und mit π multipliziert wurde. Danach wurde es mit einem Gaußschen Kernel (Halbwertsbreite 0,186 nm) gefaltet. Diese Kombination bietet eine gute Approximation eines Gaußschen Kernels mit einer Halbwertsbreite von 0,2 nm, wie sie für alle Spektren der interaktiven Grafik verwendet wird.

Referenzen & weiterführende Literatur

- 1 IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.
- 2 Friedlingstein, P. et al. (2020): Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- 3 Canadell, J.G. et al. (2021): Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.
- 4 <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstrahlung>
- 5 https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer
- 6 <https://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferlinie>
- 7 <https://de.wikipedia.org/wiki/Spektrallinie>
- 8 https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum
- 9 <https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas>
- 10 <https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhauseffekt>
- 11 <https://ocov2.jpl.nasa.gov/>
- 12 <https://disc.gsfc.nasa.gov/>
- 13 <https://de.wikipedia.org/wiki/Gau%C3%9F-Newton-Verfahren>
- 14 http://www.iup.uni-bremen.de/doas/doas_tutorial.htm
- 15 https://de.wikipedia.org/wiki/Differenzielle_optische_Absorptionsspektroskopie
- 16 https://de.wikipedia.org/wiki/Optische_Dicke
- 17 IPCC (2021): Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al.], Cambridge University Press. In Press.
- 18 IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al.], Cambridge University Press. In Press.
- 19 Gulev, S.K. et al. (2021): Changing State of the Climate System. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. In Press.
- 20 Copernicus is the European Union's Earth Observation Programme, looking at our planet and its environment for the ultimate benefit of all European citizens. The Copernicus Climate Change Service (C3S) supports society by providing

Wie wird mit Satelliten die atmosphärische CO₂-Konzentration gemessen?

authoritative information about the past, present and future climate in Europe and the rest of the World.

<https://climate.copernicus.eu>

- 21 Reuter, M., Buchwitz, M., Schneising-Weigel, O.: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) – ANNEX D for products XCO₂_EMMA, XCH₄_EMMA, XCO₂_OBS4MIPS, XCH₄_OBS4MIPS (v4.3, 01/2003-06/2020), C3S_312b_Lot2_DLR – Atmosphere, Date: 18/02/2021,
Ref: C3S_D312b_Lot2.1.3.2-v3.0_ATBD-GHG_ANNEX-D_v5.0,
https://wdc.dlr.de/C3S_312b_Lot2/Documentation/GHG/ATBD/C3S_D312b_Lot2.1.3.2-v3.0_ATBD-GHG_ANNEX-D_v5.0.pdf
- 22 Reuter, M. et al. (2020): Ensemble-based satellite-derived carbon dioxide and methane column-averaged dry-air mole fraction data sets (2003-2018) for carbon and climate applications, Atmos. Meas. Tech., <https://www.atmos-meas-tech.net/13/789/2020>
- 23 Climate Data Store (CDS) of the Copernicus Climate Change Service (C3S), <https://cds.climate.copernicus.eu>