

## Hintergrundinformation

CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> Konzentration seit der industriellen Revolution von 278ppm im Jahr 1750 auf 412ppm im Jahr 2019 [1, *A1.1.1*]. Die Einheit ppm gibt dabei an, wie viele CO<sub>2</sub>-Moleküle auf eine Millionen Luftmoleküle kommen. Da CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre chemisch sehr stabil ist, befinden sich seine Quellen und Senken nahezu ausschließlich an der Erdoberfläche. Die Menschen haben in den Jahren 2010–2019 etwa 11Gt (Gigatonnen) Kohlenstoff pro Jahr in Form von CO<sub>2</sub> hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Im gleichen Zeitraum wurden etwa 6Gt Kohlenstoff pro Jahr zu ungefähr gleichen Anteilen von der terrestrischen und der marinen Biosphäre aufgenommen [2; 3, *Section 5.1*]. Es gibt jedoch große Unsicherheiten, wer genau wie viel CO<sub>2</sub> emittiert und auch wo genau wie viel CO<sub>2</sub> von der Biosphäre aufgenommen wird. Satellitenmessungen der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration können dazu beitragen die anthropogenen Emissionen grenzübergreifend zu beobachten und die Einhaltung beschlossener Emissionsminderungsmaßnahmen zu überprüfen. Genauere Kenntnisse über die biosphärischen Kohlenstoffflüsse ermöglichen außerdem verlässlichere Klimaprognosen.

Satelliten verrichten ihre Arbeit im Weltall außerhalb der Erdatmosphäre. Deshalb messen Satelliteninstrumente in den allermeisten Fällen nicht direkt die physikalische Größe, über die sie etwas in Erfahrung bringen sollen, sondern Strahlung. Im Fall von CO<sub>2</sub> (Kohlenstoffdioxid)-Messungen mit den derzeit genauesten Satelliteninstrumenten, handelt es sich dabei um Sonnenlicht, welches an der Erdoberfläche oder zu kleinen Teilen auch innerhalb der Atmosphäre reflektiert wird (siehe Abbildung 1).

Für das menschliche Auge hat Sonnenlicht eine gelbliche Farbe. Zerlegt man es jedoch z.B. mit einem Beugungsprisma oder -Gitter in seine spektralen Bestandteile, erkennt man, dass es aus vielen Farben (Wellenlängen) besteht (Abbildung 2, links, [4]). 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]).

# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

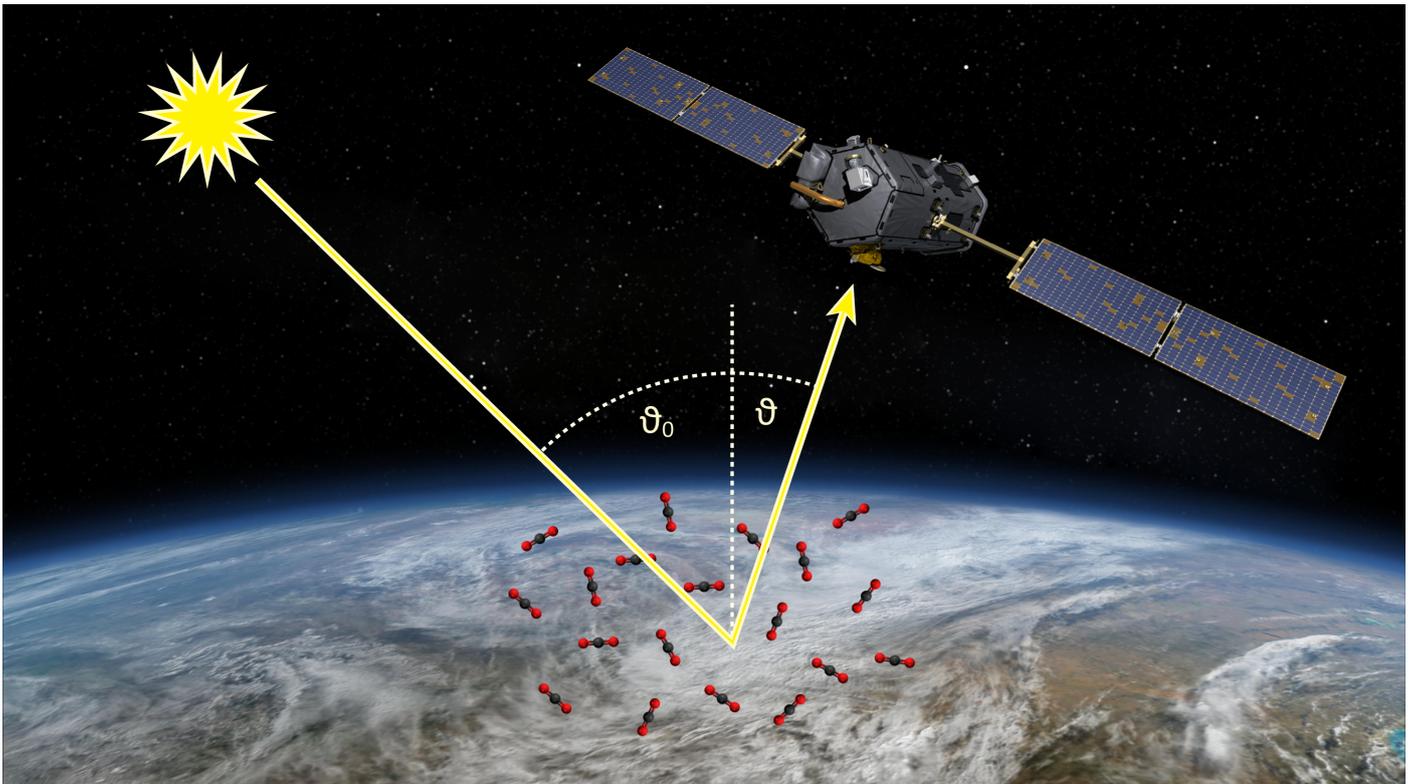


Abbildung 1: Beobachtungsgeometrie des OCO-2 Satellit der NASA: Sonnenlicht wird am Boden und zu kleinen Teilen in der Atmosphäre reflektiert und dann vom Satelliten spektroskopisch analysiert. Die rot-schwarz-rote Teilchen symbolisieren CO<sub>2</sub>-Moleküle, die Teil der Erdatmosphäre sind und die Teile des Sonnenlichtes absorbieren. Quelle Satellit und Hintergrund:

[https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Orbiting\\_Carbon\\_Observatory-2\\_artist\\_rendering\\_%28PIA18374%29.jpg](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Orbiting_Carbon_Observatory-2_artist_rendering_%28PIA18374%29.jpg); Quelle CO<sub>2</sub>-Moleküle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon\\_dioxide\\_3D\\_ball.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_3D_ball.png)

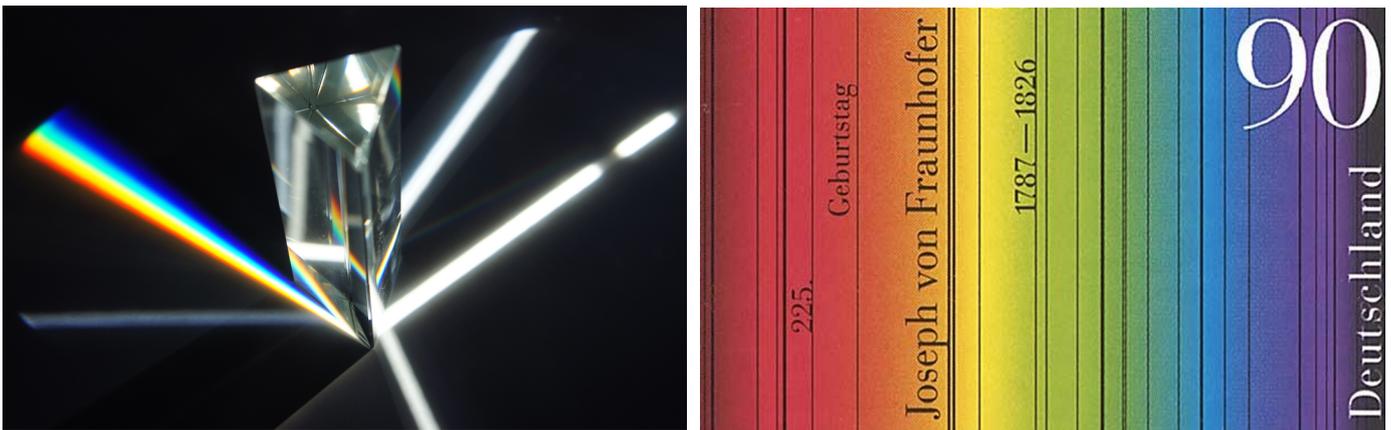


Abbildung 2: Sonnenlicht wird in einem Beugungsprisma in seine spektralen Bestandteile aufspalten (links, Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive\\_prism.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_prism.png)). Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum dargestellt auf einer 90 Cent Briefmarke der Deutschen Post zum 225. Geburtstag Joseph von Fraunhofers (rechts, Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:DPAG\\_2012\\_Fraunhofer.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:DPAG_2012_Fraunhofer.jpg)).

# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

Später fand man heraus, dass einige dieser Linien dadurch hervorgerufen werden, dass Gase in der Erdatmosphäre Teile des Sonnenlichts absorbieren, wobei die Position der Absorptionslinien [7] spezifisch für die absorbierenden Gase sind.

Die Sonne emittiert Licht (elektromagnetische Strahlung) nicht nur im für den Menschen sichtbaren Spektralbereich, sondern auch in kürzeren Wellenlängen (z.B. UV-Strahlung) und längeren Wellenlängen (z.B. Infrarotstrahlung) und auch in diesen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums [8] existieren Absorptionslinien von Gasen der Erdatmosphäre (Abbildung 3).

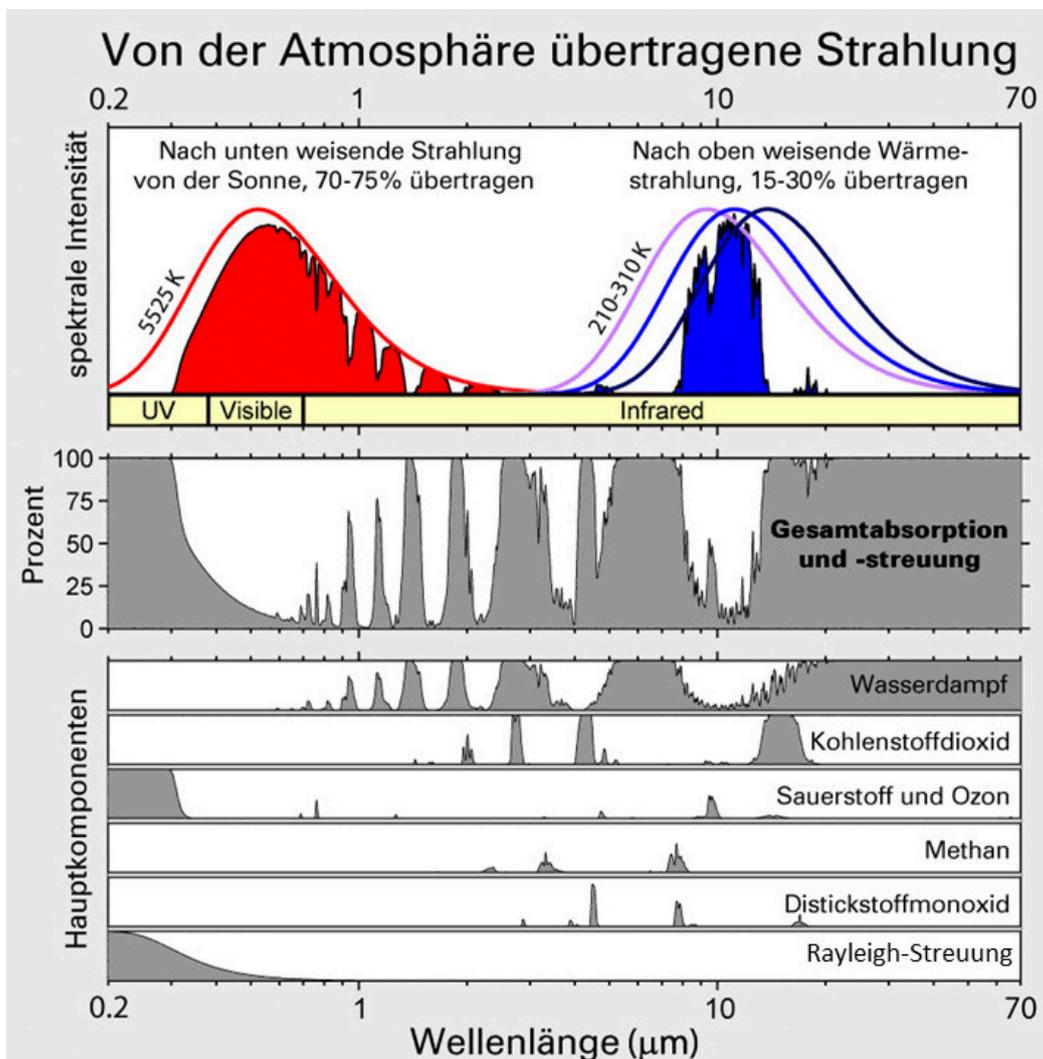


Abbildung 3: Von der Atmosphäre übertragene Strahlung als Funktion der Wellenlänge. Oben: Kurzwellige Sonnenstrahlung in Rot und langwellige Wärmestrahlung in Blau. Mitte: Anteil absorbierter Strahlung. Unten: Komponenten der absorbierten Strahlung unter anderem mit CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O. Quelle: [https://de.wikipedia.org/wiki/Idealisiertes\\_Treibhausmodell#/media/Datei:Atmospheric\\_Transmission\\_de.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Idealisiertes_Treibhausmodell#/media/Datei:Atmospheric_Transmission_de.png).

# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

CO<sub>2</sub> ist im sichtbaren Spektralbereich transparent, im nah- und thermisch-infraroten Spektralbereich hat es jedoch viele Absorptionslinien, die in Gruppen, sogenannten Linienbanden, auftreten. Im thermisch-infraroten Spektralbereich sind viele dieser Linien sehr stark. CO<sub>2</sub> ist hier also relativ 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 CO<sub>2</sub> ein effizientes Treibhausgas [9] ist.

Die meist deutlich schwächeren Absorptionsbanden im nah-infraroten Spektralbereich tragen nicht signifikant zum Treibhauseffekt [10] von CO<sub>2</sub> bei, eignen sich aber hervorragend um Rückschlüsse über die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zu ziehen. Die Stärke der Auslöschung des Lichtes, bzw. die Tiefe einer Absorptionslinie hängt unter anderem von der Konzentration des absorbierenden Gases und der Strecke ab, die das Licht in der Atmosphäre zurückgelegt hat.

Das primäre Missionsziel des OCO-2 (*Orbiting Carbon Observatory-2*, [11]) Satelliten der NASA ist es die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen, um neues Wissen über die Quellen und Senken von CO<sub>2</sub> 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: einer Sauerstoff-Absorptionsbande bei etwa 760nm, und zwei CO<sub>2</sub>-Absorptionsbanden bei etwa 1600nm bzw. 2050nm. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel einer solchen Spektralmessung von OCO-2. Bei genauer Betrachtung kann man übrigens die von OCO-2 vermessenen Spektralbanden auch in Abbildung 3 erkennen, jedoch haben die OCO-2-Messungen (Abbildung 4) eine deutlich höhere spektrale Auflösung, in der man die einzelnen Linien der Spektralbanden erkennen kann.

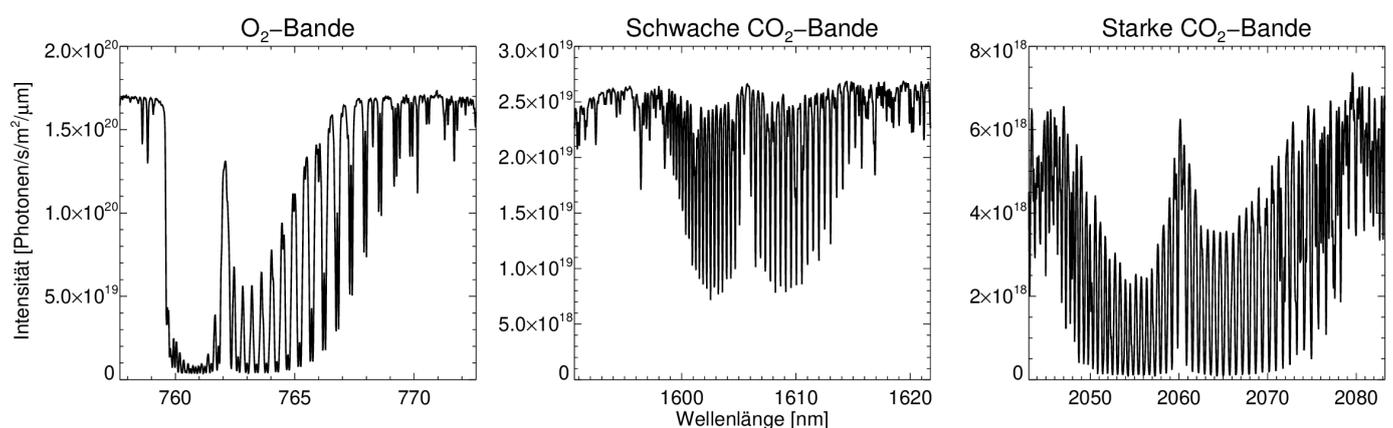


Abbildung 4: Beispiel einer Messung des OCO-2 Satelliten der NASA vom 11.02.2021. Links: O<sub>2</sub>-Bande. Mitte: schwache CO<sub>2</sub>-Bande. Rechts: starke CO<sub>2</sub>-Bande. Quelle der OCO-2-Daten: NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center [12].

# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

CO<sub>2</sub> ist chemisch sehr stabil und die Aufnahme durch die Biosphäre und die Ozeane erfolgt recht langsam. Daher verbleibt einmal emittiertes CO<sub>2</sub> meist sehr lange (hunderte von Jahren) in der Atmosphäre und reichert sich dort an. Diesen Anstieg kann man, wie auch die räumliche Verteilung, vom Satelliten messen (Abbildung 5).

## Satellitenbeobachtung des CO<sub>2</sub>-Anstiegs:

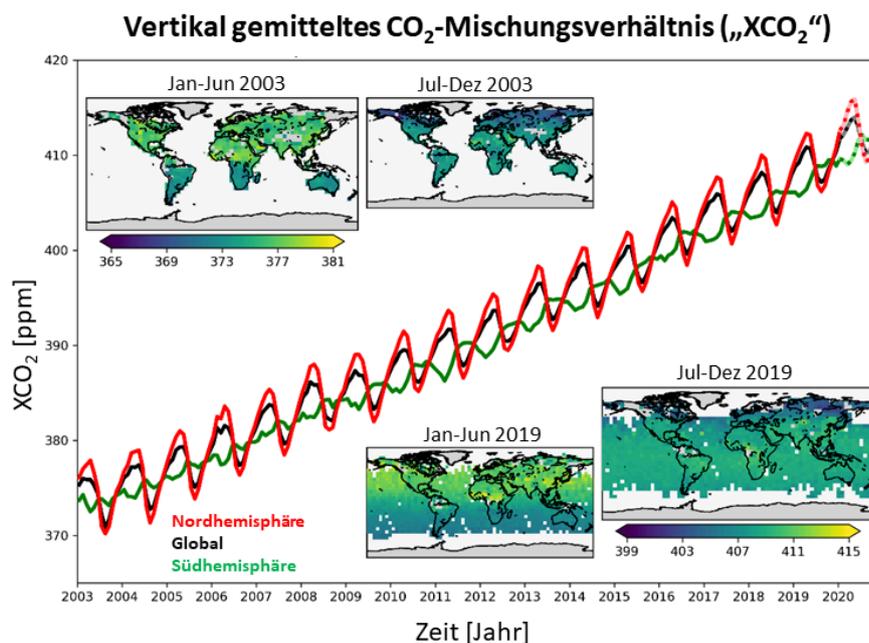


Abbildung 5: Zeitreihen und globale Karten von CO<sub>2</sub>-Satellitenmessungen. Dargestellt ist das (vertikal gemittelte) atmosphärische Mischungsverhältnis von CO<sub>2</sub> in ppm. Klar zu erkennen ist der Anstieg des CO<sub>2</sub> aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie die jahreszeitlichen Schwankungen des CO<sub>2</sub> 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/C35\\_indicators\\_ghg\\_concentrations\\_fig2\\_April21\\_branded.pdf](https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/custom-uploads/Indicators/ghg_concentrations/C35_indicators_ghg_concentrations_fig2_April21_branded.pdf)

Da sich mittlerweile schon sehr viel CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre befindet, verursachen auch starke Quellen, wie z.B. Großstädte, nur relativ kleine lokale Erhöhungen (einige ppm) der atmosphärischen Konzentration. Für die Quantifizierung der Emission einer Quelle muss man aber gerade diese lokale Erhöhung vermessen. Das heißt, dass eine relativ kleine Differenz aus zwei relativ großen Zahlen bestimmt werden muss, die beide einem Messfehler unterliegen. Typischerweise erfordert dies Messgenauigkeiten der atmosphärischen Konzentration im Bereich weniger Promille, was extreme Anforderungen an die Genauigkeit der verwendeten Satelliteninstrumente und Auswerteverfahren stellt. So ist der relative Messfehler von Strahlungsmessungen des OCO-2 Satelliten der NASA bei günstigen Bedingungen kleiner als ein Promille.



## Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

Möchte man mit Hilfe von Satellitenmessungen, wie denen von OCO-2, herausfinden, wie hoch die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration ist, versucht man in der Regel die Messung bestmöglich durch eine Simulation zu erklären. Für diese benötigt man nicht nur Eingangsgrößen die bekannt sind, wie z.B. den Sonnenzenith- und Satellitenzenithwinkel (siehe Abbildung 1), sondern auch unbekannte Größen wie den Reflexionsgrad (Albedo) des Erdbodens, den Wasserdampfgehalt und insbesondere die CO<sub>2</sub> Konzentration.

Für die erste Simulation werden alle unbekanntes Größen zunächst auf plausible, aber geratene Werte gesetzt. Danach werden die unbekanntes Eingangsparameter der Simulation (insbesondere die CO<sub>2</sub> Konzentration) so lange verändert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen gemessenem und simuliertem Spektrum erreicht wird. Die auf diese Weise bestimmte CO<sub>2</sub> Konzentration kann dann als wahre CO<sub>2</sub> Konzentration angenommen werden. In der Regel ist es übrigens nicht möglich eine perfekte Übereinstimmung zu erzielen, da z.B. die Satellitendaten ein zufälliges Rauschen enthalten und die Simulation nicht alle physikalischen Effekte berücksichtigen kann.

Für die Auswertung großer Mengen echter Satellitendaten ist dieser Prozess natürlich automatisiert (z.B. mit dem Gauß-Newton-Verfahren [13]) und die zur Simulation nötigen Strahlungstransportmodelle sind häufig sehr komplex und so Rechenintensiv, dass Rechencluster mit mehreren Tausend CPU-Kernen benötigt werden. Nichtsdestotrotz berücksichtigt die hier vorgestellte interaktive Grafik wesentliche Aspekte der Strahlungsübertragung in der Atmosphäre, so dass am Beispiel der satellitengestützten Fernerkundung von CO<sub>2</sub> die Grundzüge der differentiellen optischen Absorptionsspektroskopie verdeutlicht werden können [14, 15].

Dies beinhaltet Einblicke in spektroskopische Messungen, Lichtwege in der Atmosphäre, Absorptionsstrukturen von Gasen und das Lambert-Beer-Gesetz, welches auch in vielen anderen Bereichen Verwendung findet, z.B. bei der nicht invasiven Bestimmung der Sauerstoffsättigung des Blutes mit einem Pulsoxymeter.

# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

## Material

Zur Erarbeitung der Lernziele steht den SuS eine interaktive browserbasierte Grafik zur Verfügung, die es ihnen ermöglicht, intuitiv herauszufinden, wie man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration bestimmen kann (Abbildung 5). Die SuS schlüpfen dazu in die Rolle des Auswertalgorithmus und versuchen ein gemessenes Spektrum mit einem simulierten Spektrum in bestmögliche Übereinstimmung zu bringen, indem sie die Eingangsparameter der Simulation gezielt ändern. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist einer der Eingangsparameter und es kann davon ausgegangen werden, dass die eingestellte CO<sub>2</sub>-Konzentration der wahren CO<sub>2</sub>-Konzentration entspricht, wenn keine weitere Verbesserung der Übereinstimmung erzielt werden kann.

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 quantitativ reproduzierbare 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).

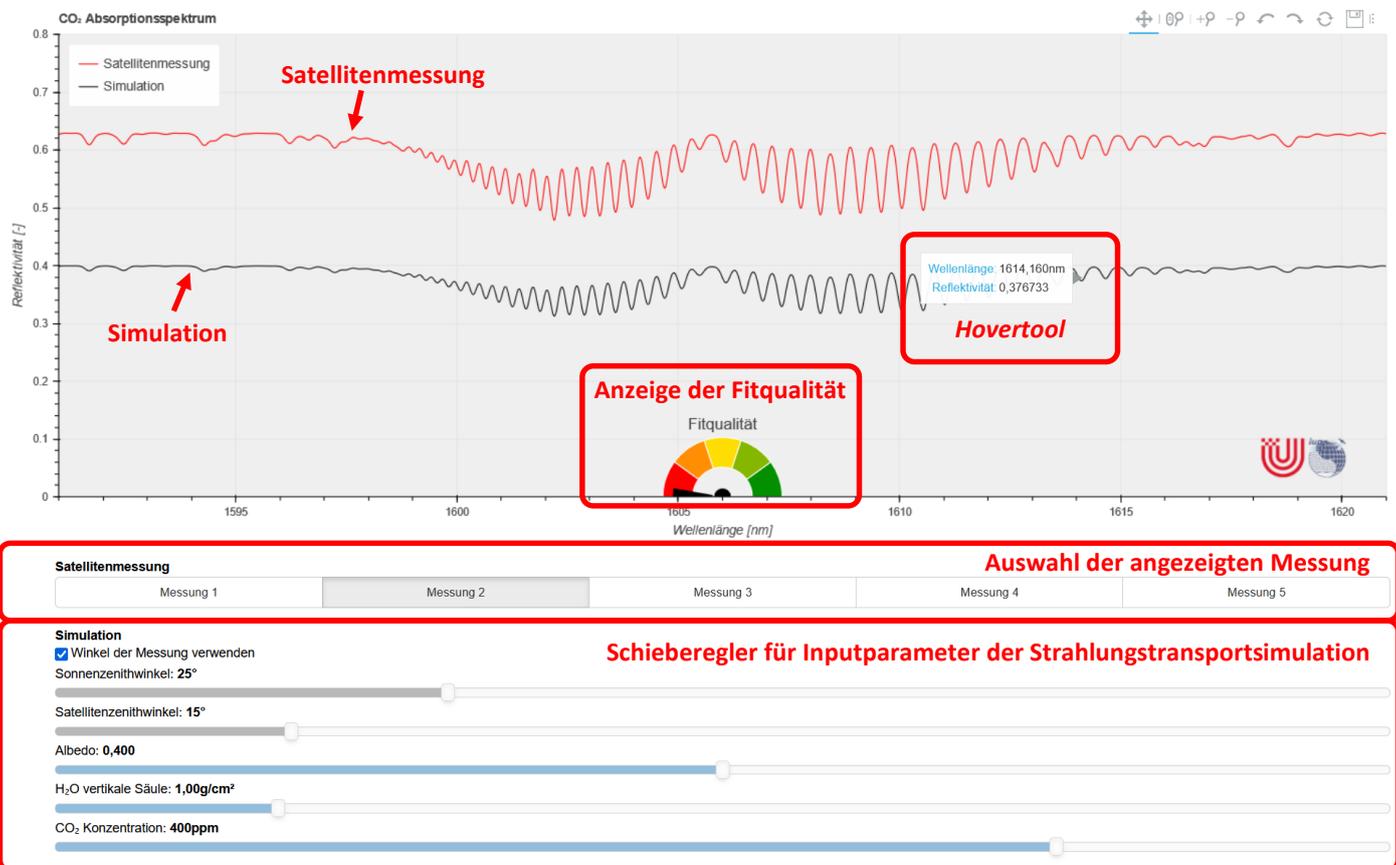


Abbildung 6: Beispielsicht der interaktiven Grafik zur Bestimmung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration mit Hilfe satellitengestützter Fernerkundung.

# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

Um hier nur das Prinzip der Anpassung von Spektren zu verdeutlichen wird der Einfachheit halber nur ein Spektrum von einer der drei von OCO-2 abgedeckten Absorptions-Banden verwendet. Dabei handelt es sich um ein Reflexionsspektrum der schwachen CO<sub>2</sub>-Absorptionsbande bei etwa 1600nm.

Ein Reflexionsspektrum beschreibt den von der Wellenlänge abhängigen Reflexionsgrad. Dieser ist 1, wenn das von der Erde (inklusive Atmosphäre) reflektierte Licht die gleiche Intensität hat, wie das von einer perfekten Lambertschen Oberfläche; einer Oberfläche, die aus allen Richtungen gleichmäßig hell erscheint. Der Reflexionsgrad ist bei einer Wellenlänge 0, wenn kein Licht von der Erde (inklusive Atmosphäre) reflektiert wird. Dies kann z.B. bei sehr dunklen Oberflächen, oder aber bei sehr starker Absorption passieren. Genau wie für Intensitätsspektren, wie die in Abbildung 4 dargestellten, gilt auch für Reflexionsspektren, dass die Tiefe der Absorptionslinien Rückschlüsse auf die CO<sub>2</sub> Konzentration zulassen. Vereinfacht kann man sagen: je mehr CO<sub>2</sub> in der Luft ist und je länger der Lichtweg durch die Atmosphäre ist, desto tiefer werden die Absorptionslinien.

Aus einem gemessenen Intensitätsspektrum des reflektierten Sonnenlichtes  $I$  und einem gemessenen Sonnenspektrum  $I_0$  kann mit Hilfe des Sonnenzenithwinkels  $\vartheta_0$  (siehe Abbildung 1) ein Reflexionsspektrum  $R$  wie folgt berechnet werden:

$$1 \quad R = \frac{I}{I_0 \cos(\vartheta_0)}$$

Möchte man genau simulieren, wie viel reflektiertes Sonnenlicht bei welcher Wellenlänge an einem Satelliteninstrument gemessen würde, verwendet man üblicherweise aufwendige Strahlungstransportrechnungen, die nicht nur die Absorption des Lichtes, sondern unter anderem auch die Streuung des Lichtes an Luftmolekülen, und kleinsten Schwebeteilchen (Aerosolen) berücksichtigen. In grober Näherung, die hier jedoch ausreichend ist, lässt sich ein vom Satelliten gemessenes Spektrum des reflektierten Sonnenlichts aber relativ einfach durch Anwendung des Lambert-Beerschen Gesetz simulieren:

$$2 \quad R = \alpha e^{-(\tau_{CO_2} + \tau_{H_2O}) \left( \frac{1}{\cos(\vartheta)} + \frac{1}{\cos(\vartheta_0)} \right)}$$

In dieser Gleichung entspricht  $\alpha$  der Albedo (Reflexionsgrad) des Erdbodens,  $\vartheta$  dem Satellitenzenithwinkel (siehe Abbildung 1) und  $\tau_{CO_2}$  und  $\tau_{H_2O}$  sind die vertikalen optischen Dicken von Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Diese sind einheitenlose Größen, die beschreiben, wie stark das Licht beim einmaligen vertikalen Durchgang durch die Atmosphäre aufgrund von Absorption des jeweiligen Gases abgeschwächt wird [16]. Für die Berechnung der vertikalen optischen Dicke benötigt man die Stoffkonzentration und den Absorptionswirkungsquerschnitt entlang des vertikalen Lichtwegs durch die Atmosphäre. Genauere Einzelheiten würden hier den Rahmen sprengen, es sei jedoch erwähnt, dass der Absorptionswirkungsquerschnitt die Position und Stärke der Absorptionslinien (d.h. die Form des

Absorptionsspektrums) bestimmt und eine Stoffeigenschaft ist, die u.a. auch vom Umgebungsdruck und der Temperatur abhängt. Die Konzentration (bzw. der Säulengehalt) des Absorbers (z.B. CO<sub>2</sub>) geht linear in die optische Dicke ein; d.h. bei einer Verdopplung der Konzentration verdoppelt sich auch die optische Dicke.

Gleichung 2 beinhaltet drei freie Fitparameter (die unbekanntes Eingangparameter  $\alpha$ ,  $\tau_{CO_2}$  und  $\tau_{H_2O}$ ), die dazu verwendet werden können die simulierte Strahlung mit der gemessenen in Übereinstimmung zu bringen. Die tatsächlichen Zusammenhänge sind wesentlich komplexer als Gleichung 2 und echte Auswertalgorithmen verwenden sehr viel komplexere Modelle mit meist deutlich mehr als 30 freien Fitparametern [17]. Demnach kann aufgrund der recht starken Vereinfachungen in Gleichung 2 nicht erwartet werden, dass mit diesem Modell besonders gute Übereinstimmungen mit tatsächlich gemessenen Spektren erzielt werden können. Aus diesem Grund wurden vier der fünf Messspektren, die in der interaktiven Grafik angezeigt werden können, auch mit Gleichung 2 simuliert und nur eins der Messspektren wurde tatsächlich von dem OCO-2 Satelliteninstrument gemessen.

## Auswählbare Satellitenmessungen

**Messung 1** basiert auf einer Simulation mit Gleichung 2 für  $\vartheta_0=50^\circ$ ,  $\vartheta=20^\circ$ ,  $\alpha = 0.33$ ,  $H_2O = 1.9g/cm^2$  und  $CO_2 = 422ppm$ . Mit einer relativ hohen CO<sub>2</sub>-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 Gleichung 2 für  $\vartheta_0=25^\circ$ ,  $\vartheta=15^\circ$ ,  $\alpha=0.63$ ,  $H_2O=1.4g/cm^2$  und  $CO_2=412ppm$ . 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 Gleichung 2 für  $\vartheta_0=40^\circ$ ,  $\vartheta=30^\circ$ ,  $\alpha=0.27$ ,  $H_2O=4.6g/cm^2$  und  $CO_2=396ppm$ . 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 Gleichung 2 für  $\vartheta_0=45^\circ$ ,  $\vartheta=25^\circ$ ,  $\alpha=0.54$ ,  $H_2O=0.4g/cm^2$  und  $CO_2=261ppm$ . Diese simulierte Messung verdeutlicht, wie sich unerkannte Wolken auf die ermittelte CO<sub>2</sub> Konzentration auswirken können. Optisch dicke Wasserwolken haben bei einer Wellenlänge von 1600nm 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 CO<sub>2</sub>-Absorptionslinien weniger tief, was als scheinbar geringere CO<sub>2</sub>-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 betragen  $\vartheta_0=14^\circ$  bzw.  $\vartheta=19^\circ$ . Mit den Eingangsparemtern  $\alpha=0.33$ ,  $H_2O=1.9g/cm^2$  und  $CO_2=422ppm$  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.

## 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 1595,5nm und 1620,0nm) entsteht. 2. Man stellt die CO<sub>2</sub>-Konzentration so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den nicht von Wasser beeinflussten Absorptionslinien (z.B. bei 1600,36nm und 1610,06nm) entsteht. 3. Man stellt die Wasserdampfsäule so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den Bereichen starker Absorption durch Wasserdampf entsteht (z.B. bei 1594,30nm, 1602,12nm und 1613,40nm). 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.

Automatische Auswerteverfahren [z.B. 17] verfolgen übrigens eine etwas andere Strategie. Anstelle die Fitparameter nach einander zu verändern berechnen sie zunächst, wie sich das Spektrum bei einer Änderung jedes einzelnen Parameters ändern würde und berechnen dann die optimale Anpassung aller Fitparameter auf einmal. Dies wird dann so lange wiederholt, bis sich die Fitparameter nicht mehr signifikant ändern.

## Weiterführende Informationen

Als Datengrundlage für die interaktive Grafik dienen Spektren der effektiven absorptions-optischen Dicke von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O im kurzweilig infraroten Spektralbereich um 1600nm, sowie ein Reflexionsspektrum im selben Spektralbereich, welches mit dem OCO-2 Satelliten gemessen wurde und vom NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center [12] bezogen wurde. Zunächst wurden mit Hilfe des Strahlungstransportprogrammes SCIATRAN der Universität Bremen Transmissionsspektren für eine typische säulengemittelte CO<sub>2</sub>-Konzentration (400ppm) und eine typische vertikale Wasserdampfsäule (2g/cm<sup>2</sup>) für eine Satellitenbeobachtungsgeometrie mit einem Luftmassenfaktor  $(1/\cos(\vartheta) + 1/\cos(\vartheta_0))$  von 2 bestimmt ( $t_{CO_2|H_2O}$ ). Diese wurden mit einem Gaußschen Kernel mit einer Halbwertsbreite von 0.2nm gefaltet ( $\langle t_{CO_2|H_2O} \rangle$ ). Anschließend wurde daraus eine effektive absorptions-optische Dicke für 1ppm CO<sub>2</sub> bzw. 1g/cm<sup>2</sup> H<sub>2</sub>O und einen Luftmassenfaktor von 1 bestimmt ( $\tau_{CO_2} = -\ln\langle t_{CO_2} \rangle / (2 \cdot 400)$ ;  $\tau_{H_2O} = -\ln\langle t_{H_2O} \rangle / (2 \cdot 2)$ ), welche die spektrale Auflösung der von der interaktiven Grafik zu berechnenden Spektren berücksichtigt.



## Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

---

Aus dem von OCO-2 gemessenen Intensitäts-Spektrum wurde zunächst ein Reflexionsspektrum approximiert, indem es durch ein mit der OCO-2-Apparatefunktion gefaltetes synthetisches Sonnenspektrum geteilt und mit  $\pi$  multipliziert wurde. Dieses wurde anschließend mit einem Gaußschen Kernel mit einer Halbwertsbreite von 0.186nm gefaltet. Die Kombination dieses Faltungskernels mit der OCO-2-Apparatefunktion ergibt eine ausreichend gute Approximation eines Gaußschen Faltungskernels mit einer Halbwertsbreite von 0.2nm, die für alle sonstigen Spektren der interaktiven Grafik verwendet wurde.

## Referenzen

- 1 IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- 2 Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H. C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P. M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R. A., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A. J. P., Sutton, A. J., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, X., and Zaehle, S.: Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>, 2020
- 3 Canadell, J.G., P.M.S. Monteiro, M.H. Costa, L. Cotrim da Cunha, P.M. Cox, A.V. Eliseev, S. Henson, M. Ishii, S. Jaccard, C. Koven, A. Lohila, P.K. Patra, S. Piao, J. Rogelj, S. Syampungani, S. Zaehle, and K. Zickfeld, 2021: Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In 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., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- 4 <https://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenstrahlung>
- 5 [https://de.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_von\\_Fraunhofer](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](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum)
- 9 <https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas>



# Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration messen?

---

- 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](http://www.iup.uni-bremen.de/doas/doas_tutorial.htm)
- 15 [https://de.wikipedia.org/wiki/Differenzielle\\_optische\\_Absorptionsspektroskopie](https://de.wikipedia.org/wiki/Differenzielle_optische_Absorptionsspektroskopie)
- 16 [https://de.wikipedia.org/wiki/Optische\\_Dicke](https://de.wikipedia.org/wiki/Optische_Dicke)
- 17 <https://www.mdpi.com/2072-4292/9/11/1159>