



Universität
Bremen



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB



Geographisches
Institut



Projektförderung:



Institut für
Umweltphysik

Fachbereich 01
Physik/Elektrotechnik

Fortbildungsveranstaltung für Lehrerinnen und Lehrer

15. Februar 2023

CO₂-Messungen aus dem Weltraum: Wie geht das?

M.Reuter, M.Buchwitz

University of Bremen

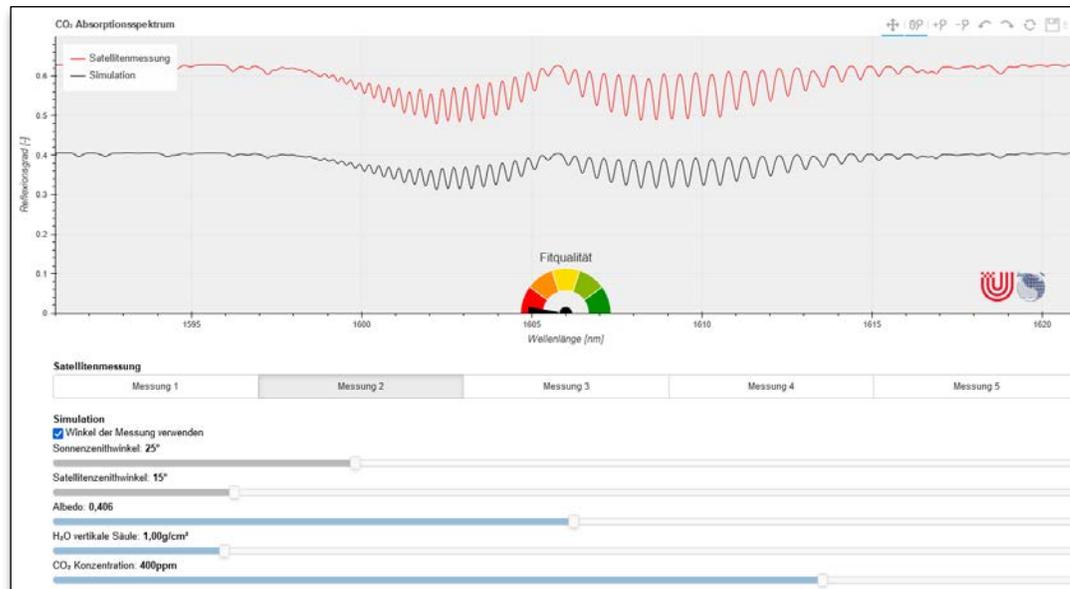
Institute of Environmental Physics, Germany



Einleitung

- In diesem Vortrag stellen wir eine im Rahmen vom Clim4Edu entwickelte interaktive Grafik vor, die veranschaulicht, wie man mit einem Satelliteninstrument die atmosphärische CO₂ Konzentration bestimmen kann.
- Die Grafik kann in jedem JS-fähigen Browser dargestellt werden und wird ergänzt durch Hintergrundinformationen, Bedienungsanleitung und Beispielaufgaben mit Musterlösungen.

2



Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO₂ Konzentration messen?

Hintergrundinformation

CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und hauptverantwortlich für den momentan stattfindenden Klimawandel [1, Figure SP04.2]. Hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger, stieg die atmosphärische CO₂ Konzentration seit der industriellen Revolution von 278ppm im Jahr 1750 auf 412ppm im Jahr 2019 [1, AT 1.1]. Die Einheit ppm gibt dabei an, wie viele CO₂ Moleküle auf eine Million Luftmoleküle kommen. Da CO₂ 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 100 (96) Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in Form von CO₂ hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Im gleichen Zeitraum wurden etwa 100 (100) Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in ungefähr gleichen Anteilen von den terrestrischen und den marinen Biosphären aufgenommen [2, 3, Section 5.1]. Es gibt jedoch große Unsicherheiten, wie genau wie viel CO₂ emittiert und auch wie genau wie viel CO₂ von der Biosphäre aufgenommen wird. Satellitenmessungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration können dazu beitragen die anthropogenen Emissionen grenzübergreifend zu beobachten und die Einhaltung bestimmter Emissionsreduzierungsmaßnahmen zu überprüfen. Gewisse Hinweise über die atmosphärischen 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 CO₂ (Kohlenstoffdioxid) Messungen mit dem derzeit genauesten Satelliteninstrumenten, handelt es sich dabei um Sonnenlicht, welches an der Erdoberfläche oder zu kleineren Höhen 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 Beugungsgitter oder -Gitter in seine spektralen Bestandteile, erkennt man, dass es aus vielen Farben (Wellenlängen) besteht (Abbildung 2, links, [4]). 1914 entdeckte der deutsche Physiker und Optiker Joseph von Fraunhofer [5] dunkle Linien im Spektrum des Sonnenlichts, die nach ihm benannten Fraunhoferlinien (Abbildung 2, rechts, [6]).

Version: 23.09.2022
Kontakt: Maximilian Reuter (mreuter@iag.physik.uni-bremen.de)
Projekt-Förderung: DLR Raumfahrtagentur (50BR23010)

Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO₂ Konzentration messen?

Aufgaben und Musterlösungen

Nenne die physikalische Einheit in der die atmosphärische CO₂ Konzentration üblicherweise angegeben wird und erläutere deren Bedeutung.
Einheit: ppm (parts per million); Bedeutung: Anzahl von CO₂ Molekülen pro eine Millionen Luftmoleküle.
Anforderungsbereich: I

Leitziel: Die physikalische Einheit in der die atmosphärische CO₂ Konzentration üblicherweise gemessen wird und deren Bedeutung.

Berechne einige große Quellen und Senken von CO₂.
Quellen: Mega-Gton, Kraftwerke, Senken: boreale Wälder; Ozeane in mittleren Breiten.
Anforderungsbereich: I

Leitziel: Basiswissen über die Quellen und Senken des atmosphärischen CO₂.

Erkläre warum satellitengestützte Messungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration benötigt werden. Erläutere Beobachtung der Emissionen und Emissionsreduzierungsmaßnahmen, besseren Verständnis der Prozesse des Kohlenstoffzyklus und zu genauere Klimaprognosen.
Anforderungsbereich: II

Leitziel: Motivation für die satellitengestützte Fernerkundung der atmosphärischen CO₂ Konzentration.

Berechne die unbekannten Parameter, die für die Simulation der Reflexionsspektren verwendet werden und beschreibe deren Einfluss auf die simulierten Strahlung.
Abgabe: Skalierung des gesamten Spektrums; H₂O: Tiefe der H₂O-Linien; CO₂: Tiefe der CO₂-Linien.
Anforderungsbereich: III

Leitziel: Grundlagen des Messprinzips.

Entwickle und beschreibe ein Verfahren, mit dem Du das simuliert mit dem gemessenen Reflexionsspektrum in bestmögliche Übereinstimmung bringen kannst.
1) Stelle die Albedo so ein, dass die beste Übereinstimmung in den absorptionsfreien Bereichen (z.B. bei 1595,5nm und 1620,0nm) entsteht. 2) Stelle die CO₂-Konzentration so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den nicht von Wasser beeinflussten Absorptionslinien (z.B. bei 1600,0nm und 1610,0nm) entsteht. 3) Stelle die Wasserdampfsäule so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den Bereichen starker Absorption durch Wasserdampf entsteht (z.B. bei 1390,0nm, 1400,0nm und 1410,0nm). 4) Prüfe, dass jede maximale Wertebiegung einer der drei Parameter zu einer schlechteren Fitqualität führt, ist dies nicht der Fall begründe warum bei 1).

Anforderungsbereich: III

Leitziel: Grundlagen des Messprinzips.

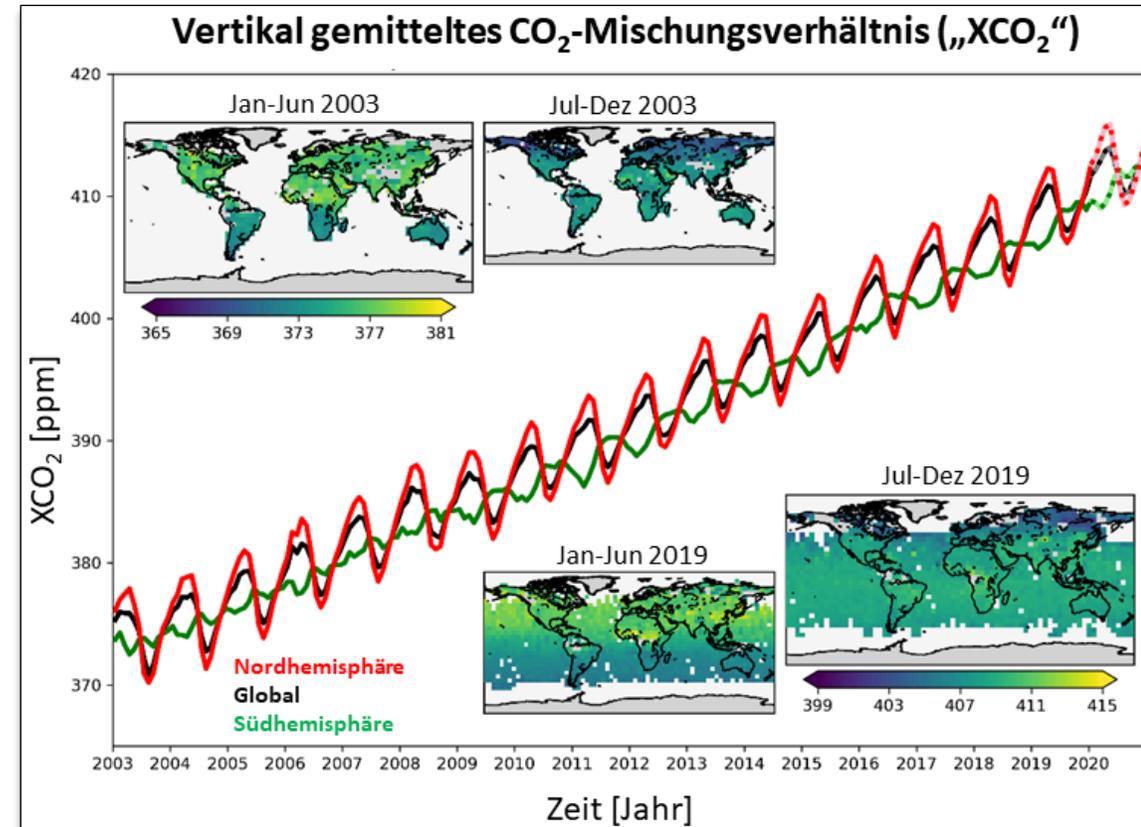
Version: 23.09.2022
Kontakt: Maximilian Reuter (mreuter@iag.physik.uni-bremen.de)
Projekt-Förderung: DLR Raumfahrtagentur (50BR23010)

<https://fis.rub.de/klima/satelliten-messen-co2>



Einleitung

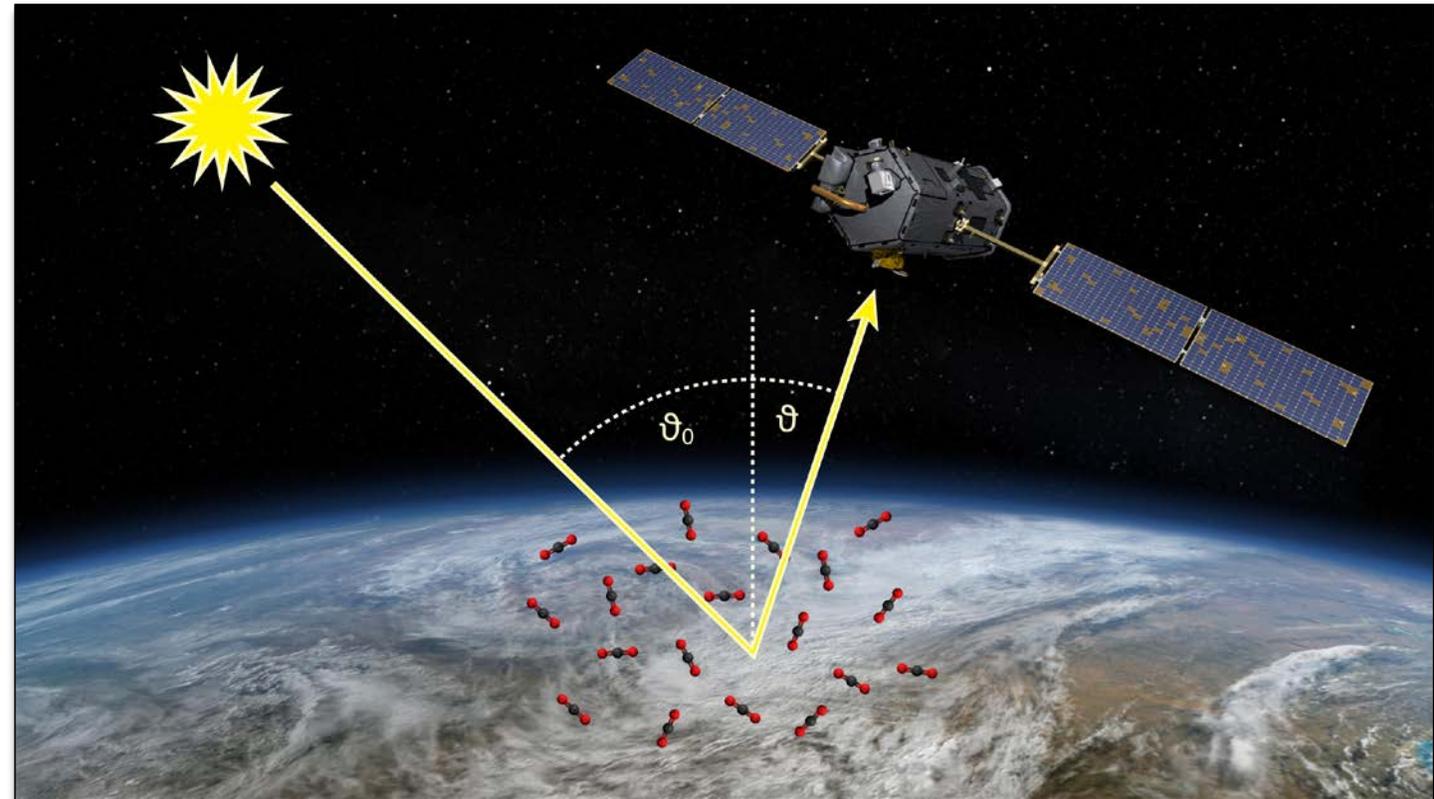
- CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und hauptverantwortlich für den Klimawandel.
- Es gibt Große Unsicherheiten, wer genau wie viel CO₂ emittiert und auch wo genau wie viel CO₂ von der Biosphäre aufgenommen wird.
- Satellitenmessungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration können dazu beitragen die anthropogenen Emissionen grenzübergreifend zu beobachten und die Einhaltung beschlossener Emissionsminderungsmaßnahmen zu überprüfen (Klimaabkommen von Paris).
- Genauere Kenntnisse über die biosphärischen Kohlenstoffflüsse ermöglichen außerdem verlässlichere Klimaprognosen.
- Satellitenmessungen nach dem in diesem Vortrag beschriebenen Messprinzip wurden erstmals Ende 2002 mit dem SCIAMACHY Instrument möglich.





Satelliten messen Strahlung, nicht CO₂

- 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 CO₂-Messungen mit den derzeit genauesten Satelliteninstrumenten, handelt es sich dabei um Sonnenlicht.
- Auf dem Weg zum Satelliten durchstrahlt dieses die Atmosphäre und wird am Erdboden (oder in der Atmosphäre) reflektiert.



Satellit und Hintergrund: https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Orbiting_Carbon_Observatory-2_artist_rendering_%28PIA18374%29.jpg
CO₂-Moleküle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carbon_dioxide_3D_ball.png

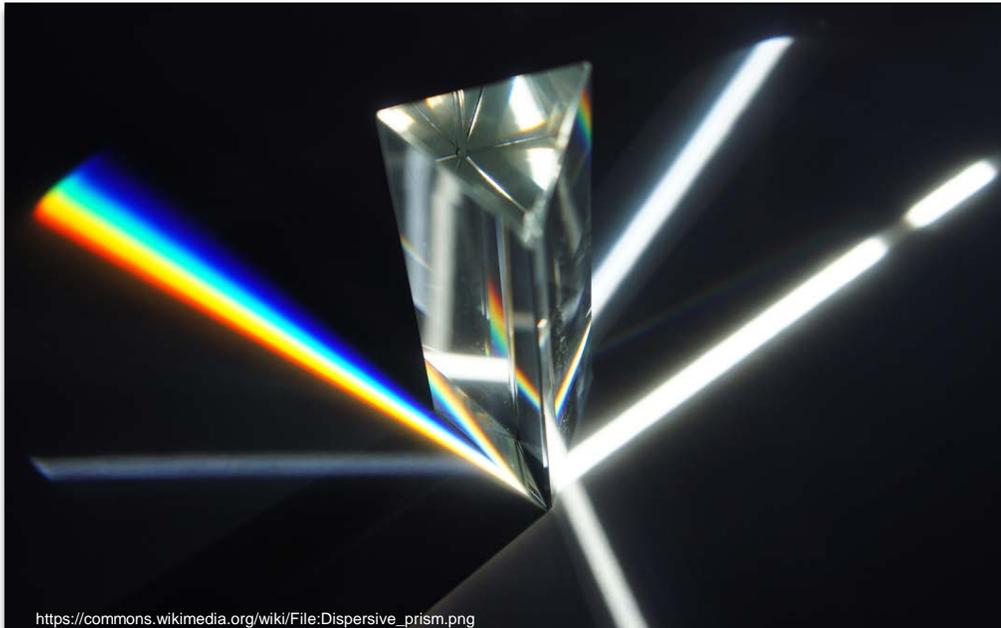


Dunkle Linien im Sonnenlicht

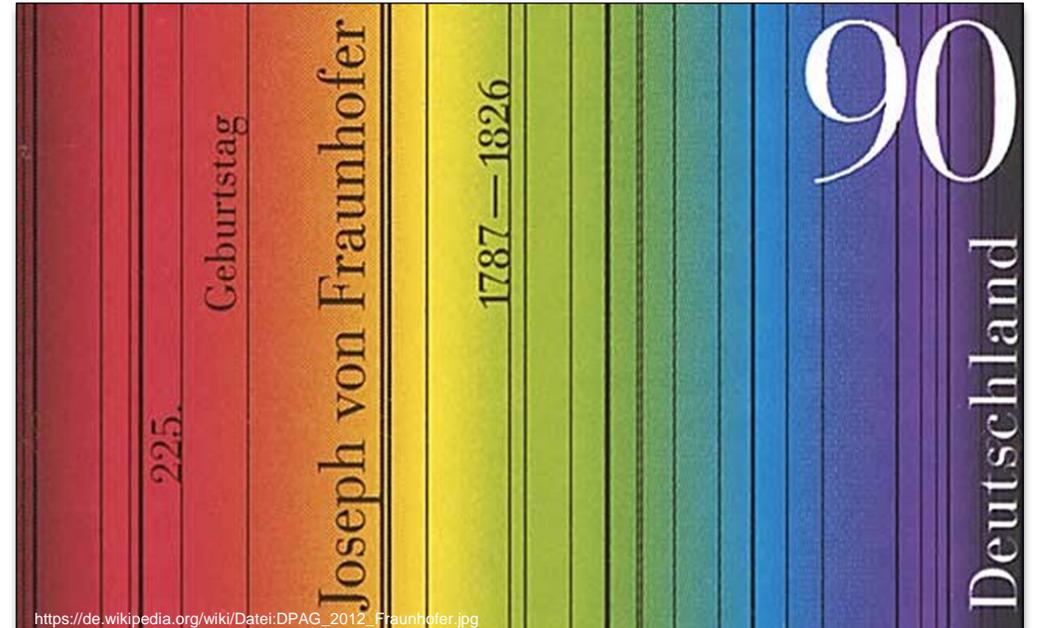


- Für das menschliche Auge hat Sonnenlicht eine gelbliche Farbe.
- Zerlegt man es jedoch z.B. mit einem Beugungsprisma oder -Gitter in seine spektralen Bestandteile, erkennt man, dass es aus vielen Farben (Wellenlängen) besteht.
- 1814 entdeckte der deutsche Physiker und Optiker Joseph von Fraunhofer dunkle Linien im Spektrum des Sonnenlichtes, die nach ihm benannten Fraunhoferlinien.
- 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 spezifisch für die absorbierenden Gase sind.

5



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dispersive_prism.png



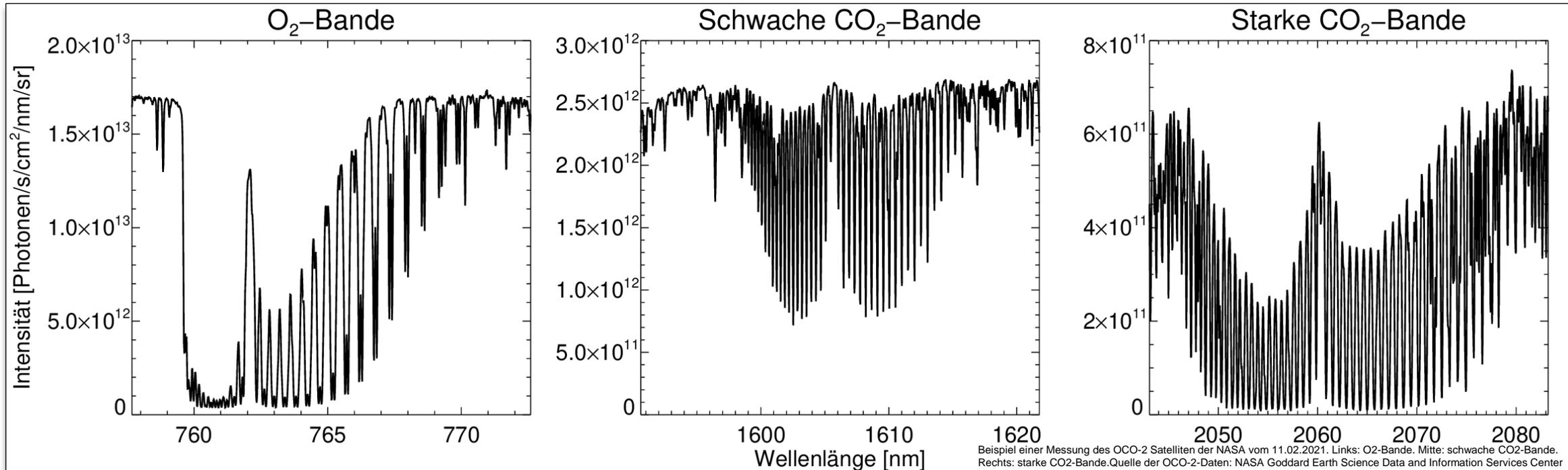
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:DPAG_2012_Fraunhofer.jpg



Messprinzip (vereinfacht)

- Die Sonne emittiert Licht auch außerhalb des für den Menschen sichtbaren Spektralbereichs (z.B. UV oder IR).
- Auch in diesen haben viele Gase der Erdatmosphäre Absorptionslinien.
- NASAs OCO-2 (*Orbiting Carbon Observatory-2*) Satellit misst das vom Erdboden und in der Atmosphäre reflektierte Sonnenlicht in drei Spektralbändern im nah-infrarot.
- **Messprinzip (vereinfacht):** Je stärker die Auslöschung des Lichtes, bzw. je tiefer die Absorptionslinien, desto größer die Konzentration des absorbierenden Gases.

6





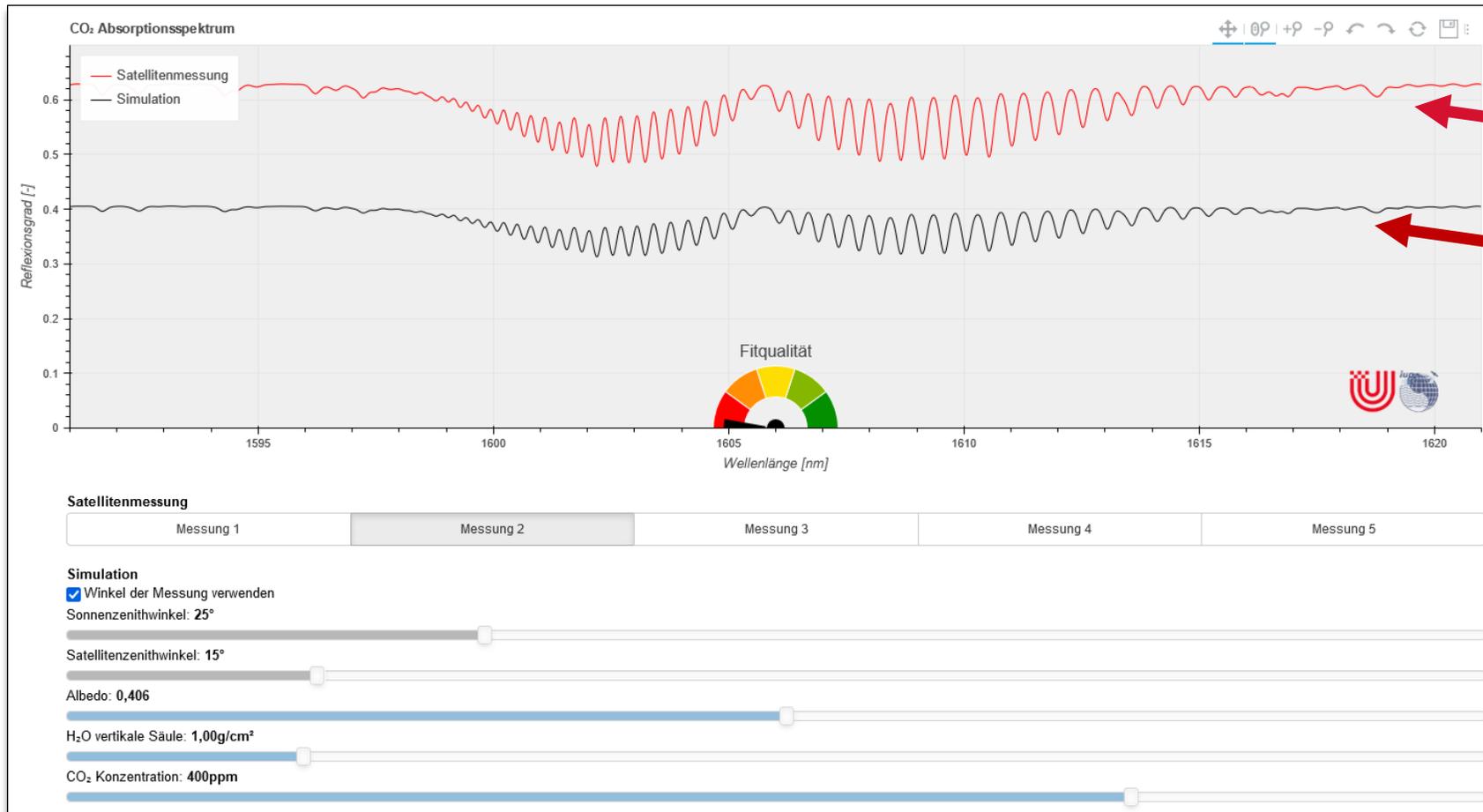
Messprinzip (vereinfacht)

- In der Regel versucht man bei der sog. differentiellen optischen Absorptionsspektroskopie die Satellitenmessung bestmöglich durch eine Simulation zu erklären.
- Für diese benötigt man bekannte Eingangsgrößen wie z.B. Sonnen- und Satellitenzenithwinkel und unbekannte Größen wie den Reflexionsgrad des Erdbodens (Albedo), den Wasserdampfgehalt und die CO₂-Konzentration.
- Für die erste Simulation werden alle unbekanntes Größen „geraten“.
- Danach werden die unbekanntes Größen so lange angepasst, bis die Simulation bestmöglich mit der Messung überein stimmt.
- Die auf diese Weise bestimmte CO₂-Konzentration kann dann als die wahre CO₂-Konzentration angenommen werden.
- Für die Auswertung echter Satellitendaten mit vielen Mio Beobachtungen ist dieser Prozess natürlich automatisiert und die Simulationen hängen von sehr vielen unbekanntes Größen ab und sind sehr rechenintensiv.



Interaktive Grafik

- Mit der interaktiven Grafik können die SuS intuitiv erfahren, wie die satellitengestützte Fernerkundung von CO₂ funktioniert.
- Die SuS schlüpfen in die Rolle des Auswertalgorithmus und versuchen ein simuliertes mit einem gemessenen OCO-2 Spektrum in bestmögliche Übereinstimmung zu bringen.



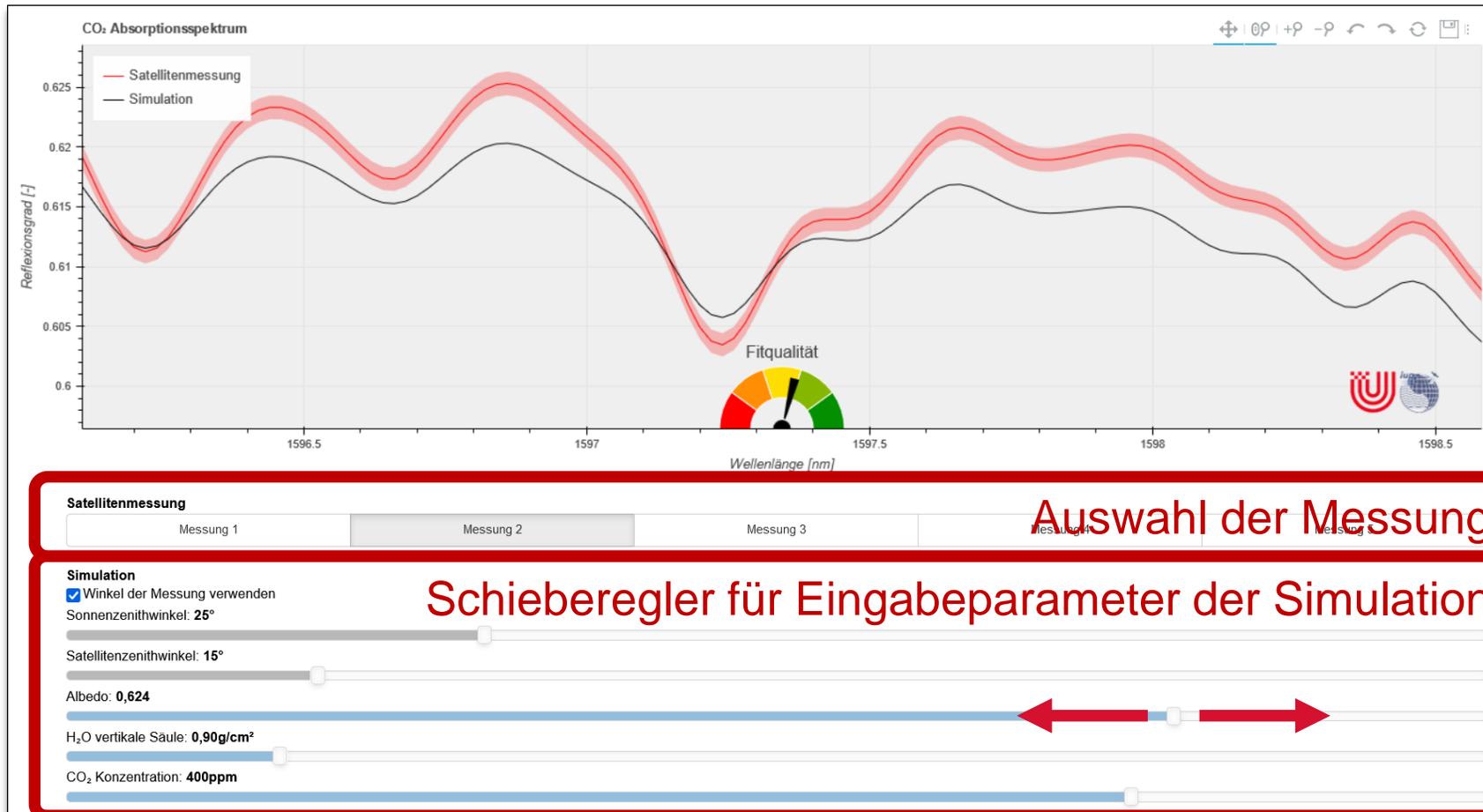
Messung

Simulation



Interaktive Grafik

- Es stehen 5 verschiedene Messungen zur Verfügung die ausgewertet werden können.
- Die Eingabeparameter der Simulation lassen sich durch Schieberegler einstellen.
- Um Unterschiede besser sichtbar zu machen kann in der Grafik gezoomt werden.



Auswahl der Messung

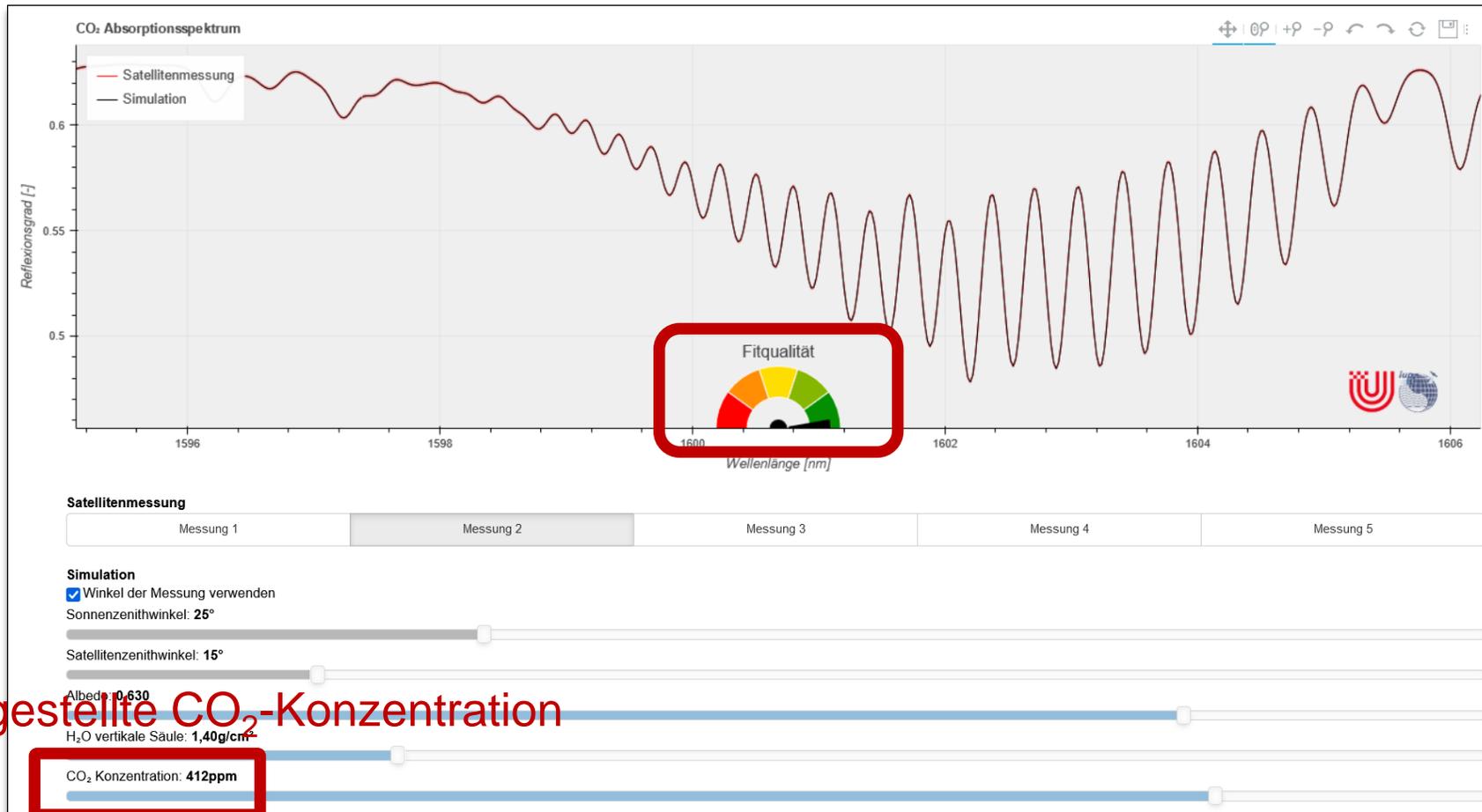
Schieberegler für Eingabeparameter der Simulation



10

Interaktive Grafik

- Ein Indikator stellt qualitativ die Güte der Übereinstimmung grafisch dar.
- Wenn keine weitere Verbesserung der Übereinstimmung erzielt werden kann entspricht die eingestellte CO₂-Konzentration der wahren.



Eingestellte CO₂-Konzentration



Aufgabe 1 (Anforderungsbereich: I+II)

Benenne die unbekannt Parameter, die für die Simulationen der Reflexionsspektren verwendet werden und beschreibe ihren Einfluss auf die Simulation.



Aufgabe 1 (Anforderungsbereich: I+II)

Benenne die unbekannt Parameter, die für die Simulationen der Reflexionsspektren verwendet werden und beschreibe ihren Einfluss auf die Simulation.

Albedo: Skalierung des gesamten Spektrums.

H₂O: Tiefe der H₂O-Linien.

CO₂: Tiefe der CO₂-Linien.

Lernziel: Grundlagen des Messprinzips.



Aufgabe 2 (Anforderungsbereich: III)

Entwickle und beschreibe ein Verfahren, mit dem Du das simulierte mit dem gemessenen Reflexionsspektrum in bestmögliche Übereinstimmung bringen kannst.



Aufgabe 2 (Anforderungsbereich: III)

Entwickle und beschreibe ein Verfahren, mit dem Du das simulierte mit dem gemessenen Reflexionsspektrum in bestmögliche Übereinstimmung bringen kannst.

- 1) Stelle die Albedo so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den absorptionsfreien Bereichen entsteht.
- 2) Stelle die CO_2 -Konzentration so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den nicht von Wasser beeinflussten Linien entsteht.
- 3) Stelle die Wasserdampfsäule so ein, dass bestmögliche Übereinstimmung in den Bereichen starker Absorption durch Wasserdampf entsteht.
- 4) Prüfe, dass jede minimale Verstellung einer der drei Parameter zu einer schlechteren Fitqualität führt. Ist dies nicht der Fall beginne wieder bei 1).

Lernziel: Grundlagen des Messprinzips.



Aufgabe 3 (Anforderungsbereich: II+III)



- a) Bestimme die unbekanntenen Eingabeparameter für Messung 2.
- b) Diskutiere, warum es sich um eine Messung über der Sahara handeln könnte.

15



Aufgabe 3 (Anforderungsbereich: II+III)



- a) Bestimme die unbekanntenen Eingabeparameter für Messung 2.
- b) Diskutiere, warum es sich um eine Messung über der Sahara handeln könnte.

a) Albedo = 0.630
 $H_2O = 1.40g/cm^2$
 $CO_2 = 412ppm$

b) Wüsten haben einen rel. hohen Reflexionsgrad (Albedo).

Lernziel: Grundlagen des Messprinzips und Interpretation von Ergebnissen.



Wesentliche Erkenntnisse

- Man kann mit optischen Methoden berührungslos aus der Entfernung (Fernerkundung) etwas über die Zusammensetzung der Atmosphäre lernen.
- Einblicke in spektroskopische Messungen und Absorptionsstrukturen von Gasen.
- Das vorgestellte Messprinzip eignet sich nicht nur für die satellitengestützte Fernerkundung von CO_2 , sondern kann und wird auch für andere Gase und Beobachtungsgeometrien eingesetzt.
- Verwandte Verfahren finden auch in vielen andere Bereichen Anwendung, z.B. bei der nicht invasiven Bestimmung der Sauerstoffsättigung des Blutes mit einem Pulsoxymeter.