



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

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

Benenne einige große Quellen und Senken von CO₂.

Quellen: Mega-Cities, Kraftwerke. Senken: boreale Wälder; Ozeane in mittleren Breiten.

Anforderungsbereich: I

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

Erkläre wofür satellitengestützte Messungen der atmosphärischen CO₂ Konzentration benötigt werden.

Globale Beobachtung der Emissionen und Emissionsminderungsmaßnahmen, besseres Verständnis der Prozesse des Kohlenstoffzyklus und so genauere Klimaprognosen.

Anforderungsbereich: II

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

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

Albedo: Skalierung des gesamten Spektrums. H₂O: Tiefe der H₂O-Linien. CO₂: Tiefe der CO₂-Linien.

Anforderungsbereich: I+II

Lernziel: Grundlagen des Messprinzips.

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 (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 1600,36nm und 1610,06nm) entsteht. 3) Stelle 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) Prüfe, dass jede minimale Verstellung einer der drei Parameter zu einer schlechteren Fitqualität führt. Ist dies nicht der Fall beginne wieder bei 1).

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Grundlagen des Messprinzips.



Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO₂ Konzentration messen?

Bestimme für alle fünf gemessenen Spektren die CO₂-Konzentration, die Albedo und den Wasserdampfsäulengehalt.

- 1) $\alpha = 0.33$, H₂O = 1.9g/cm², CO₂ = 422ppm
- 2) $\alpha = 0.63$, H₂O = 1.4g/cm², CO₂ = 412ppm
- 3) $\alpha = 0.27$, H₂O = 4.6g/cm², CO₂ = 396ppm
- 4) $\alpha = 0.54$, H₂O = 0.4g/cm², CO₂ = 261ppm
- 5) $\alpha = 0.33$, H₂O = 1.9g/cm², CO₂ = 422ppm

Anforderungsbereich: II

Lernziel: Grundlagen des Messprinzips.

Diskutiere, bei welchem der gemessenen Spektren es sich um ein Spektrum über den Tropen, Deutschland, einer Wolke oder der Sahara handeln könnte. Vier der Messspektren wurden in Wirklichkeit nur simuliert. Diskutiere, welches der fünf Messspektren eine echte Satellitenmessung darstellt.

Deutschland=Spektrum 1; relativ hohe CO₂-Konzentration, moderate Albedo und Wasserdampfsäule, relativ tief stehende Sonne. Sahara=Spektrum 2: Hohe Albedo, niedrige Wasserdampfsäule, hochstehende Sonne. Tropen = Spektrum 3: sehr große Wasserdampfsäule. Wolke = Spektrum 4: sehr hohe Albedo, sehr geringe scheinbare CO₂-Konzentration (aufgrund verkürztem Lichtweg). Echte Messung = Spektrum 5: der Fit ist nicht perfekt möglich aufgrund der sehr stark vereinfachten Simulation und Rauschen auf der Messung.

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Interpretation von Ergebnissen.

Beschreibe wie sich das simulierte Spektrum ändert, wenn man die Winkel der Messung ändert und diskutiere den Grund für die Änderung. Diskutiere außerdem, ob es möglich wäre, die CO₂-Konzentration zu bestimmen, wenn einer der Winkel nicht bekannt wäre.

Die Winkel ändern die Länge des Lichtweges durch die Atmosphäre, wobei längere Lichtwege zu tieferen Linien führen da mehr CO₂-Moleküle innerhalb des Lichtwegs liegen. eine Veränderung des Lichtwegs wirkt sich genauso auf das Spektrum aus, wie eine Änderung der Absorbermengen. Man kann also dasselbe Spektrum mit unterschiedlichen Kombinationen aus Winkeln und Absorbermengen herstellen. Ohne die Winkel zu kennen wäre es also nicht möglich die CO₂-Konzentration zu bestimmen.

Anforderungsbereich: II+III

Lernziel: Vertiefung des Messprinzips.

Diskutiere, warum für die Messungen eine hohe Spektrale Auflösung vorteilhaft ist.

Um Bereiche mit und ohne Absorption voneinander trennen zu können und um zwischen den Absorptionslinien verschiedener Gase (z.B. CO₂, H₂O) unterscheiden zu können.



Wie kann man vom Satelliten die atmosphärische CO₂ Konzentration messen?

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Vertiefung des Messprinzips.

Diskutiere warum CO₂-Messungen vom Satelliten nur in (nahezu) wolkenfreien Fällen möglich sind und wie sich eine optisch Dicke (undurchsichtige) Wolke auf die Ergebnisse auswirken könnte.

Wird das Sonnenlicht an einer Wolke gestreut ist der Lichtweg nicht mehr exakt bekannt. Bei einer optisch dicken Wolke würde das Sonnenlicht nicht mehr bis zum Boden kommen, sondern bereits an der Wolke reflektiert werden. Der Lichtweg wäre also viel kürzer und damit die ermittelte CO₂-Konzentration viel geringer.

Anforderungsbereich: III

Lernziel: Vertiefung des Messprinzips.

Bestimme für Messung 5 die relative Genauigkeit bei 1592nm (nutze das Zoom-Tool um die Genauigkeit der Messung anhand der Größe des hellroten Bereichs bestimmen zu können). Diskutiere warum es sehr hohe Genauigkeitsanforderungen an CO₂-Messungen vom Satelliten gibt.

Reflexionsgrad bei 1592nm (rote Kurve): 0.29107; Genauigkeit (eine Standardabweichung, Hälfte des hellroten Bereichs): $(0.29140-0.29074)/2=3.3 \cdot 10^{-4}$; relative Genauigkeit: 1.133%. Überschüssiges CO₂ wird in der Atmosphäre nur sehr langsam abgebaut (hunderte Jahre). Deshalb gibt es bereits viel CO₂ in der Atmosphäre und selbst große Quellen und Senken erzeugen nur relativ kleine lokale Erhöhungen im Vergleich zur Hintergrundkonzentration.

Anforderungsbereich: II+III

Lernziel: Umgang mit Messunsicherheiten. Anforderungen an die satellitengestützte Fernerkundung von CO₂.

Bringe zunächst die gemessene und die simulierte Strahlung für Messung 2 in Übereinstimmung. Bestimme für die CO₂ Absorptionslinie bei 1602,54nm, um wie viel Prozent sich das simulierte Signal ändert, wenn die CO₂-Konzentration um 1ppm erhöht wird. Vergleiche dies qualitativ mit der Unsicherheit der Satellitenmessung und diskutiere, warum Satellitenmessungen dennoch Genauigkeiten erreichen können, die besser als 1ppm sind.

Die Änderung beträgt 0.063% und ist damit deutlich kleiner als die Unsicherheit der Messung an dieser Stelle. Die CO₂-Konzentration könnte aus solch einer Messung dennoch mit einer höheren Genauigkeit als 1ppm bestimmt werden, da in einem Spektrum sehr viele Messungen an unterschiedlichen Wellenlängen gibt.

Anforderungsbereich: II+III

Lernziel: Umgang mit Messunsicherheiten. Anforderungen an die satellitengestützte Fernerkundung von CO₂.