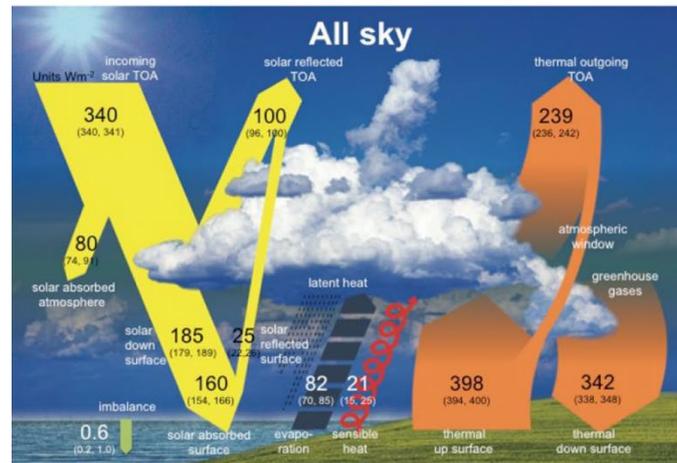


Anhang A: Weshalb lassen sich mit vollständigen Strahlungsbilanzschemata keine qualitativen Argumente für den Einfluss von CO₂ ableiten?



Schema aus Abbildung 7.2 aus dem 6. IPCC-Bericht, Kapitel 7, S. 7-177. Die Werte entsprechen der Leistung in W/m², die Wertepaare in Klammern dem jeweiligen Unsicherheitsintervall.

Obwohl dieses Schema sehr gut geeignet ist, alle Phänomene zu verstehen, die in der Atmosphäre eine Rolle spielen, reicht es dennoch nicht aus, um eine sinnvolle Diskussion über die Auswirkungen des Anstiegs der Treibhausgase auf die globale Temperatur zu führen. Diese setzt nämlich voraus, dass parallel über die Energiebilanz der Erdoberfläche und der Atmosphäre argumentiert wird. Die Zuführung von THG hat jedoch simultane, unterschiedliche und nicht offensichtliche Auswirkungen auf die Entwicklung der drei Infrarotleistungen, die in diesen beiden Bilanzen eine Rolle spielen (die drei orangenen Pfeile). Insbesondere bei der Infrarotleistung, die von der gesamten Atmosphäre in Richtung Boden abgestrahlt wird (rechter Pfeil), bedeuten mehr Treibhausgase sowohl mehr Infrarotemission als auch mehr Absorption durch die unteren Schichten der Atmosphäre.

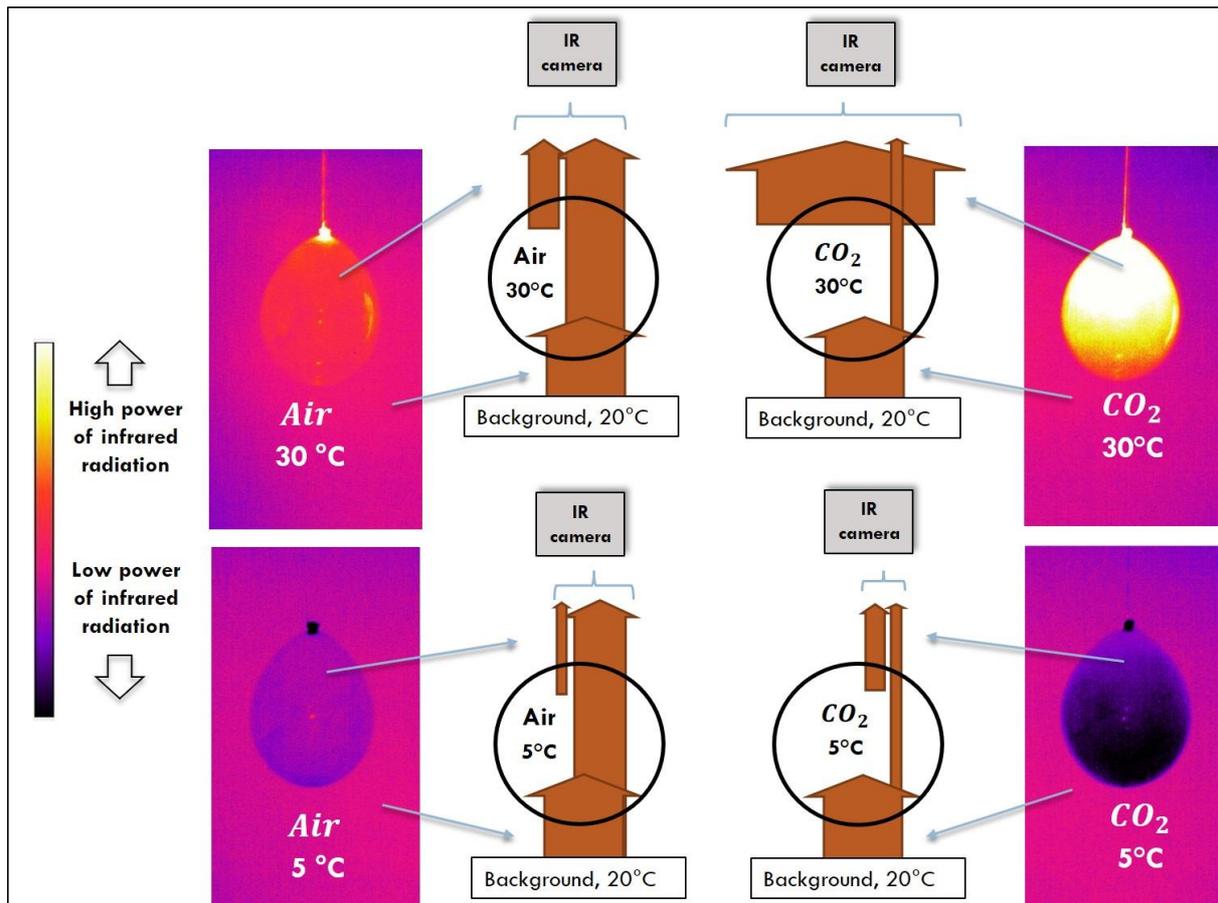
Wie können wir also wissen, ob die an der Erdoberfläche ankommende Infrarotleistung bei der Zufuhr von Treibhausgasen letztendlich steigen oder sinkt? Dafür muss die Abhängigkeit der emittierten und absorbierten Infrarotleistung von der THG-Konzentration und der Temperatur berücksichtigt werden, die sich beide mit der Höhe ändern. An diesem Punkt ist eine qualitative Argumentation über das vollständige Schema technisch nicht mehr möglich. Klimaphysiker benötigen dies jedoch nicht, da sie alle gleichzeitig in der Atmosphäre ablaufenden Prozesse direkt simulieren und dabei alle Abhängigkeiten zwischen den physikalischen Größen berücksichtigen. Eine qualitative Argumentation lässt sich einfacher und kohärenter entwickeln, wenn die Analyse auf die Strahlungsbilanz zwischen dem System Erde und dem Weltraum beschränkt wird, ohne dass alle anderen physikalischen Phänomene berücksichtigt oder vernachlässigt werden müssen. In den IPCC-Berichten wird bei der Definition der Treibhausgasemissionen weder die Absorption von Infrarotstrahlung durch die Atmosphäre noch die von der Atmosphäre an die Erdoberfläche abgegebene Strahlung direkt

Die Supertrouper – Episode Klima – Pädagogischer Inhalt

berücksichtigt. Daher entspricht die Fokussierung auf die Strahlungsbilanz in den oberen Schichten der Atmosphäre auch weitgehend der offiziellen Definition des Treibhauseffekts.

Anhang B: Ausführliche Interpretation der Infrarotbilder von kalten und warmen Ballons

Die bei kalten oder warmen Ballons gemessene Infrarotstrahlung setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Im Folgenden wird erläutert, wieviel Strahlung der Ballon (bestehend aus Membran und Gas) selbst abgibt und wieviel Strahlung von der Erdoberfläche er durchlässt.



Bei der vom Ballon ausgehenden Strahlung wird nicht zwischen der Emission von der Membran und der Emission des Gases im Inneren des Ballons unterschieden. Beim Vergleich der Luft- und CO₂-Ballons bei gleicher Temperatur kann der Unterschied in der Strahlung lediglich auf denjenigen Parameter zurückgeführt werden, der sich ändert, nämlich auf die Art des Gases (die von der Membran emittierte Strahlungskomponente ist in beiden Fällen gleich, da sie bei der gleichen Temperatur emittiert wird). Alles in allem setzt diese Darstellung voraus, dass die Absorptionskapazität (die Breite des entsprechenden Pfeils) temperaturunabhängig ist. (Dies gilt zwar für den hier betrachteten Temperaturunterschied, kann an dieser Stelle jedoch nicht näher erläutert werden.) Im Fall des kalten CO₂-Ballons ist die geringere ausgehende Strahlungsleistung auf zwei Faktoren zurückzuführen: Erstens wird mehr Hintergrundstrahlung absorbiert (was die Transmission verringert) und zweitens emittiert der CO₂-Ballon aufgrund seiner niedrigeren Temperatur weniger Strahlung. Sucht man eine einfache Erklärung des Phänomens, dann ist diese detailliertere Interpretation für die weitere

Argumentation und die Analogie zum System Erde nicht unbedingt erforderlich. Sie ist jedoch wichtig, um das zuvor erläuterte „Sättigungsargument“ zu klären, bei dem die Emission und deren Temperaturabhängigkeit nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund haben wir uns für den Unterrichtsaufbau dafür entschieden, dieses Phänomen mit dem warmen CO₂-Ballon zu veranschaulichen, auch wenn dies für die weitere Argumentation nicht zwingend erforderlich ist.

Anhang C: Begründung für die Extrapolation der Beobachtungen der Ballons auf die Atmosphäre

Ein wesentlicher Aspekt der vorgeschlagenen Aufbau-logik ist die Extrapolation des Einflusses von zusätzlichem CO₂ in der Atmosphäre auf die Strahlungsbilanz der Erde, basierend auf Infrarotbeobachtungen von kalten Ballons, die mit Luft und CO₂ gefüllt sind. Bei dieser Extrapolation ist es notwendig, die potenziellen Auswirkungen anderer atmosphärischer Eigenschaften im Verhältnis zu den Ballons zu berücksichtigen. Die Argumentation greift die zentralen Punkte auf, die im Abschnitt zur Inhaltsanalyse dargelegt wurden.

Ein erster Unterschied ist die erhebliche Diskrepanz in der CO₂-Konzentration: Während die Atmosphäre lediglich 0,04 % CO₂ enthält, sind es beim Ballon 100 % CO₂. Wenn man den signifikanten Volumenunterschied des durchdrungenen Gases in den beiden Szenarien berücksichtigt, stellt man fest, dass der Ballon etwa 26 g CO₂ enthält, während eine vertikale Säule der Atmosphäre mit einem Durchmesser von 30 cm rund 424 g CO₂ aufweist. Demnach entspricht die CO₂-Menge, die durch den Ballon zugeführt wird, der Erhöhung des CO₂-Gehalts in einer atmosphärischen Säule über einen Zeitraum von etwa 10 Jahren (zwischen 2014 und 2024)¹. Anhand dieses Vergleichs lassen sich einige wichtige Unterschiede zwischen der Säule und dem Ballon herausarbeiten:

- 1) In der Atmosphärensäule sinken mit zunehmender Höhe sowohl die Temperatur als auch der Druck von CO₂, während diese Parameter im Ballon konstant und homogen bleiben.
- 2) Die Atmosphärensäule enthält zusätzlich Wasserdampf, der im gleichen Infrarotstrahlungsbereich wie CO₂ wirkt.
- 3) Durch die Zugabe von 26 g CO₂ in die Atmosphärensäule erhöht sich deren Gesamtmasse von 424 g auf 450 g, während im Ballon die CO₂-Menge von 0 g auf 26 g ansteigt.
- 4) Die Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre erfolgt allmählich, während die CO₂-Zufuhr im Ballon abrupt erfolgt.

¹ Aus der Gesamtmasse des CO₂ in der Atmosphäre ergibt sich für eine vertikale Säule mit einer Fläche von 1 m² ein Wert von 6 kg CO₂. Eine Säule mit einem Durchmesser von 30 cm (berechnet als 3,14 x 15² cm²) enthält folglich 424 g CO₂. Bei einem Volumen von 14 Litern für einen Ballon mit 30 cm Durchmesser befinden sich darin 26 g CO₂ (resp. 1,87 g/Liter). Somit enthält die gesamte Atmosphärensäule die gleiche Menge CO₂ wie 16 CO₂-Ballons. Da die CO₂-Menge im Ballon im Vergleich zur Gesamtmenge vernachlässigbar ist, resultiert der Rückgang der Infrarotstrahlung, die aus dem kalten CO₂-Ballon austritt, daraus, dass ihm 26 g zusätzliches, kälteres CO₂ im Weg stehen. Für die Gegenwart bedeutet das für in Bezug auf die Atmosphäre, dass eine Zunahme von 26 g CO₂ in einer Säule, die bereits 424 g CO₂ enthält, einem Konzentrationsanstieg von etwa 6 % entspräche, was gemäß der CO₂-Entwicklungskurve dem Anstieg zwischen 2014 und 2024 entspricht.

Welchen Einfluss könnten diese verschiedenen Aspekte auf die Veränderung der Infrarotleistung haben, die in den Weltraum abgegeben wird?

1) Einfluss von Temperaturgradient und Druck

Zunächst ist der Einfluss des Temperaturgradienten in der Atmosphärensäule zu betrachten. Eine mögliche Analogie hierfür ist die Vorstellung einer Reihe von CO₂-Ballons, die immer kälter werden. Da jeder nachfolgende Ballon kälter ist als der zuvor, verringert sich die emittierte Infrarotstrahlung mit jedem zusätzlichen Ballon (von unten nach oben). Der Temperaturgradient ändert somit nichts an der qualitativen Schlussfolgerung, die man aus einem einzelnen Ballon mit homogener Temperatur (kälter als der Boden) ziehen kann: eine Verringerung der ausgehenden Infrarotstrahlung. Allerdings kann bei dieser Analogie nicht der mit zunehmender Höhe abnehmende Druck in der Atmosphärensäule berücksichtigt werden. Physikalisch bewirkt die Druckabnahme, dass die gleiche Masse an CO₂ eine geringere Absorptionskapazität aufweist, aber dennoch weiterhin absorbiert. Daher bleibt die qualitative Schlussfolgerung auch im Vorliegen eines Druckgradienten unverändert.

2) Vorhandensein von Wasserdampf

Ein weiterer entscheidender Unterschied in der Atmosphärensäule ist das Vorhandensein anderer THG, insbesondere von Wasserdampf. Dieser absorbiert Infrarotstrahlung in einem Wellenlängenbereich, der sich teilweise mit dem von CO₂ deckt. Wie bereits erwähnt, ist Wasserdampf vor allem in den unteren Schichten der Atmosphäre konzentriert. In der Analogie der übereinander liegenden Ballons bedeutet dies, dass Wasserdampf hauptsächlich in den unteren Ballons vorhanden ist. Die darüber liegenden Ballons (die ausschließlich CO₂ enthalten) sind jedoch kälter, da sie sich in größerer Höhe befinden. Folglich ist die emittierte Infrarotstrahlung aus diesen höheren, kälteren Ballons geringer als die Strahlung, die aus den unteren Ballons mit Wasserdampf austritt.

3) Sättigung des CO₂-Effekts in Abhängigkeit von seiner Quantität

Beim Hinzufügen eines CO₂-Ballons steigt die Menge des von der Strahlung durchdrungenen CO₂ von 0 g auf 26 g, während sie in einer Atmosphärensäule von 424 g auf 450 g ansteigt. Man könnte annehmen, dass ab einer bestimmten CO₂-Konzentration ein Sättigungseffekt eintritt, sodass der Übergang von 424 g auf 450 g keinen weiteren Einfluss auf die Verringerung der Infrarotstrahlung hat, obwohl ein solcher Effekt beim Übergang von 0 g auf 26 g beobachtet werden kann. Wie in der Inhaltsanalyse festgestellt, tritt dieser Sättigungseffekt jedoch nur in Gegenwart von Wasserdampf auf. Für die obige Analogie bedeutet dies, dass ein zusätzlicher CO₂-Ballon, der sich oberhalb der Ballons mit Wasserdampf befindet, die emittierte Infrarotstrahlung trotz der bereits vorhandenen CO₂-Konzentration weiter verringern würde. Somit bleibt die qualitative Schlussfolgerung gültig, dass die Zugabe von CO₂ in einer Atmosphärensäule auch in Anwesenheit von Wasserdampf wirksam ist. Das CO₂ verteilt sich über die gesamte Schichtdicke und wirkt somit auch in den Schichten, die oberhalb des Wasserdampfs liegen.

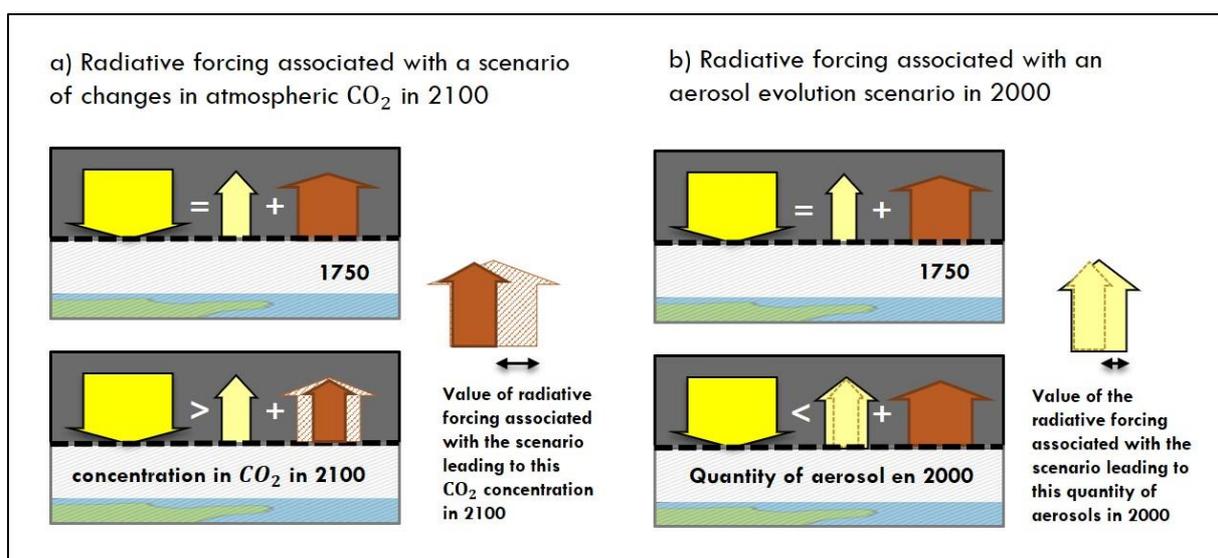
4) Allmähliche oder abrupte Zugabe von CO₂

Der letzte zu betrachtende Unterschied zwischen dem Hinzufügen eines CO₂-Ballons und dem Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, besteht darin, dass der Anstieg in der Atmosphäre allmählich erfolgt und dass damit eine kontinuierliche Anpassung der in die Strahlungsbilanz einbezogenen Leistungswerte einhergeht. Dieser kontinuierliche Anstieg kann jedoch auch als Summe kleiner, diskontinuierlicher Anstiege betrachtet werden, wobei jeder einzelne Anstieg einen geringen Rückgang der ausgehenden Strahlung und damit einen leichten Temperaturanstieg zur Folge hat.

Demgegenüber ermöglichen die „abrupte“ Zugabe einer bestimmten Menge CO₂, wie im Fall des Ballons, sowie die anschauliche Darstellung des Rückgangs der in diesem Moment ausgehenden Infrarotstrahlung eine Bestimmung des Begriffs „Strahlungsantrieb“ (oder „Klimaantrieb“) für Laien. Der Strahlungsantrieb, der mit einem CO₂-Szenario im Jahr 2100 verbunden ist, lässt sich beispielsweise anhand der folgenden Berechnung ermitteln (s. Fall a), Abbildung 23):

- Zunächst wird die Referenzsituation im Jahr 1750 betrachtet, in der die ein- und ausgehende Strahlungsleistung gleich sind.
- Nun wird die CO₂-Konzentration abrupt durch den Wert ersetzt, den sie einem bestimmten Szenarios zufolge im Jahr 2100 erreichen würde.
- In diesem Moment kommt es zu einem Rückgang der ausgehenden Infrarotstrahlungsleistung. Die Differenz zwischen der ein- und ausgehenden Strahlungsleistung stellt den „Strahlungsantrieb“ im Jahr 2100 dar, der mit diesem CO₂-entwicklungsszenario verbunden ist.

Mit derselben Logik kann man den Strahlungsantrieb definieren, der mit der Entwicklung einer beliebigen Größe verbunden ist, die zu einem beliebigen Zeitpunkt einen Einfluss auf die Strahlungsbilanz hat (siehe Fall b) in Abb. 23 für den Strahlungsantrieb in Verbindung mit Aerosolen im Jahr 2000).



Diese Darstellung ermöglicht eine Definition des Strahlungsantriebs, die mit der in der Klimaphysik gängigen Definition übereinstimmt, im Gegensatz zu den Definitionen, die im Lehrplan für den naturwissenschaftlichen Unterricht der Oberstufe oder in vielen populärwissenschaftlichen Ressourcen, wie beispielsweise dem Klimafresko, zu finden sind. Dort wird der Strahlungsantrieb als „die Differenz zwischen der empfangenen und der abgegebenen Strahlungsenergie“ (MEN, 2023, S. 9) definiert, ohne den Zeitfaktor zu berücksichtigen. Diese Formulierung suggeriert fälschlicherweise, dass es sich um eine Differenz zu einem bestimmten Zeitpunkt handelt. In der Physik entspricht diese Definition dem Konzept des „Strahlungsungleichgewichts“ und vermittelt den irreführenden Eindruck, der Strahlungsantrieb sei eine messbare physikalische Größe. Tatsächlich impliziert die Definition jedoch, dass es sich um die Wirkung einer sofortigen Veränderung eines bestimmten Parameters handelt, obwohl derartige Veränderungen in der Regel allmählich erfolgen (außer vielleicht im Falle eines Vulkanausbruchs). Wie bereits erwähnt, bedeutet eine allmähliche Veränderung eines Parameters, dass die Strahlungsbilanz nach und nach wieder ins Gleichgewicht gelangt. Daher stimmt der Begriff „Strahlungsantrieb“ im Allgemeinen nicht mit einem messbaren Wert überein. Der Nutzen dieser Größe liegt vielmehr darin, dass sie es ermöglicht, die Auswirkungen mehrerer Parameter unter Verwendung derselben Einheit und Berechnungsregel zu vergleichen. Eine ausführlichere Darstellung des Konzepts des Strahlungsantriebs findet sich unter anderem in „Horizons Climatiques“ (Dion & Henrion, 2024, S. 68-70), die auf gemeinsamen Überlegungen der Autoren des Comics und dieses Artikels basiert.