

„Die Erde hat Fieber – und das Fieber steigt.“

Albert 'Al' Gore,
amerikanischer Politiker und Unternehmer



■ Unser Klima ändert sich

Die Atmosphäre und der Ozean haben sich erwärmt, die Schnee- und Eismengen sind zurückgegangen, der Meeresspiegel ist angestiegen und Wetterextreme häufen sich. Betrachtet man die globale Durchschnittstemperatur, zeigt sich: Jedes Jahr nach 2000 war wärmer als jedes Jahr vor 2000 mit Ausnahme von 1998 (Abb. 1). Im Jahr 2016 lag die globale Durchschnittstemperatur um 1,3°C über dem Durchschnitt von 1850-1900.

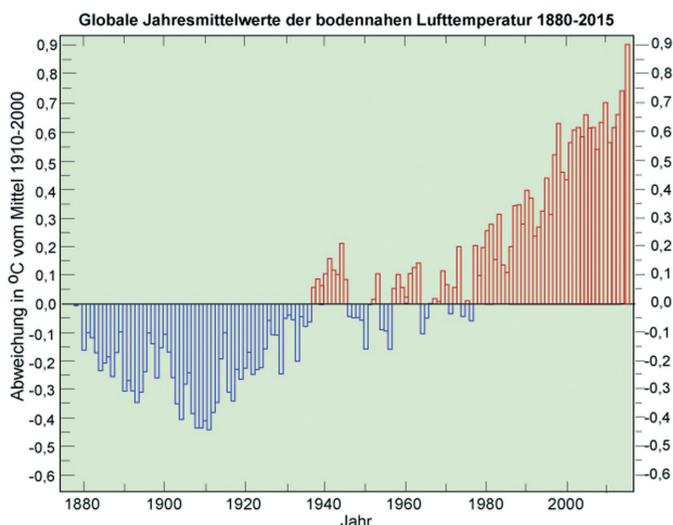


Abb. 1: Globale Jahrestemperaturmittel 1880-2015

Dargestellt sind die Jahresmittel der bodennahen globalen Lufttemperatur seit Beginn globaler instrumenteller Messungen als Abweichung vom Mittel der Jahre 1910 bis 2000. Deutlich tritt eine Erwärmung in zwei Phasen von ca. 1910 bis 1940 und verstärkt seit den 80er Jahren hervor.

<http://bildungsserver.hamburg.de/klimaaenderung-nav/2041618/durchschnittstemperatur-150-jahre/>

■ Die Hockeyschlägerkurve

Das Klima der letzten tausend Jahre hat der Klimawissenschaftler Michael Mann für die Nordhalbkugel in einem Diagramm dargestellt (Abb. 2).

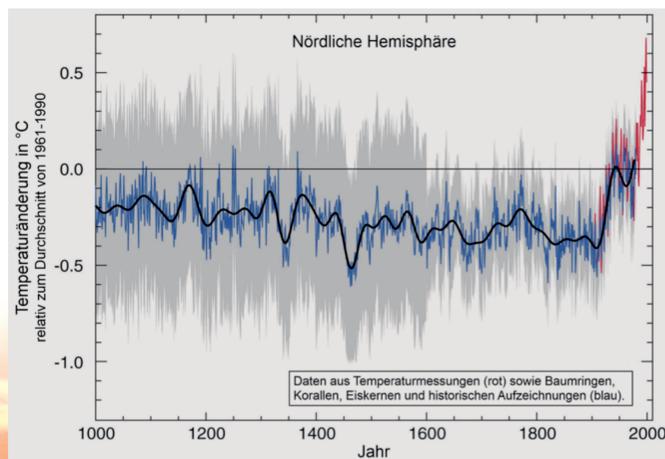


Abb. 2: Die Hockeyschläger-Kurve

für die Temperaturen auf der Nordhalbkugel für die Jahre 1000-2000 nach Mann. Die grauen Flächen markieren Unsicherheitsbereiche.

Quelle: http://www.meteo.psu.edu/holocene/public_html/Mann/research/research_graphics.php

Es ähnelt in seinem Verlauf einem Hockeyschläger. Er nutzte als Klimaarchive für seine Untersuchungen Baumjahresringe, Korallen, Eisbohrkerne (Abb. 3) und historische Aufzeichnungen.



Abb. 3: Eisbohrkern

Mann wurde wegen seiner Arbeiten von Klimaskeptikern und Industrie-lobbyisten heftig angegriffen. Doch gleich fünf Untersuchungen bestätigen ihn. Der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) urteilte 2013: »In der Nordhemisphäre war 1983-2012 wahrscheinlich die wärmste 30-Jahr-Periode der letzten 1400 Jahre.«

Inzwischen ist es auf der Erde womöglich sogar wärmer als jemals zuvor in den letzten 120.000 Jahren. Dabei hat der Klimawandel gerade erst begonnen.

Der fundamentale Unterschied zwischen Wetter und Klima

► Unter **Wetter** versteht man den **momentanen Zustand der Atmosphäre** an einem bestimmten Ort der Erdoberfläche. Dieser tritt u. a. als Sonnenschein, Bewölkung, Regen, Wind, Hitze, Kälte und Luftdruck in Erscheinung.

Der Wetterablauf ist chaotisch und nur für **wenige Tage** im Voraus **vorhersagbar**.

► Das **Klima** beschreibt die Statistik des Wetters über eine längere Zeit von z. B. 30 Jahren, ausgedrückt vor allem in **Durchschnittswerten**, etwa der Temperatur oder des Niederschlags. **Aussagen zum Klima** sind auch **langfristig möglich**: Der Sommer wird bei uns auch in fünfzig Jahren wärmer als der Winter sein, aufgrund des vorhersagbaren Sonnenstands. Gibt man eine mögliche zukünftige Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen vor, lassen sich Aussagen über den erwartbaren Klimawandel treffen (Station 8).

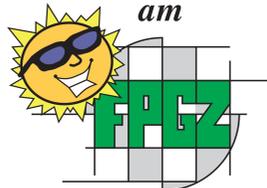
Fazit:

Die globale Mitteltemperatur hat sich in den letzten 150 Jahren um etwa ein Grad erhöht. Die letzten 30 Jahre waren auf der Nordhalbkugel wahrscheinlich der **wärmste 30-Jahreszeitraum der letzten 1400 Jahre**. Die zukünftige Entwicklung des Klimas als Statistik des Wetters ist in Klimaszenarien darstellbar.

Klimawandel
zum Anfassen

www.klimaausstellung.de

Verein für Schule und Umwelt
am

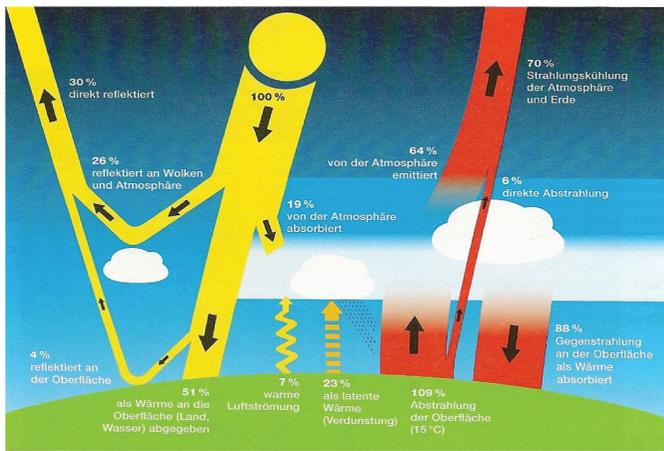


Ferdinand-Porsche-Gymnasium Zuffenhausen

„Die Menschen führen ein langfristiges geophysikalisches Experiment einer Art aus, die in der Vergangenheit nicht möglich gewesen wäre und in der Zukunft nicht wiederholbar sein wird.“
 Roger Revelle, Otto Suess, Ozeanographen, 1957

Versuch

Sie sehen zwei Glasbehälter, die von einer Lichtquelle angestrahlt werden. Der eine Glasbehälter enthält Luft, der andere das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂). Vergleichen Sie die Temperatur in den beiden Behältern!



Energiebilanz der Erde im Weltall

Das Sonnenspektrum enthält viele Wellenlängen
 Wärmestrahlung

Die dargestellten Energieströme sind mittlere gegenwärtige Werte auf die mittlere Einstrahlung S_0 bezogen:
 $S_0 = 342 \text{ W/m}^2 = 100\%$

Abb. 1: Die Energiebilanz der Erde.

Der natürliche Treibhauseffekt

Was Sie hier im Kleinen sehen, funktioniert auch im Großen: Die Spurengase Wasserdampf, Methan, CO₂ und Ozon in der Erdatmosphäre wirken in gewisser Weise wie ein Treibhaus und machen unsere Erde überhaupt erst zu einem wohnlichen Planeten (vgl. Abb. 1). Die Erde absorbiert einen Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung, wandelt ihn in langwellige Wärmestrahlung um und strahlt diese Richtung Weltall aus. Treibhausgase nehmen diese Wärmestrahlung auf und strahlen einen Teil davon zurück zur Erde. Dank dieses natürlichen Treibhauseffekts ist es auf der Erde durchschnittlich statt -18°C etwa $+14^\circ\text{C}$ warm.

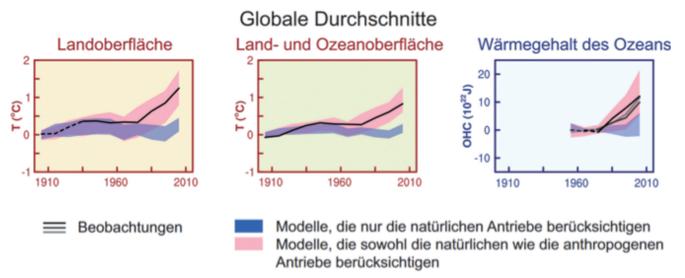


Abb. 2: Vergleich des beobachteten und des simulierten Klimawandels
 Nach IPCC 2013.
http://www.deipcc.de/_media/IPCC_AR5_WG1_SPM_deutsch_WEB.pdf, S. 16

Menschen verstärken den Treibhauseffekt

Im Vergleich zur Periode 1850-1900 ist es im Zeitraum 2003-2012 auf der Erdoberfläche um etwa $0,78^\circ\text{C}$ wärmer geworden. Klimamodelle, die nur natürliche Ursachen, etwa Veränderungen in der Sonnenstrahlung und Vulkanausbrüche, berücksichtigen, können den Klimawandel etwa ab den 70er Jahren nicht erklären.

Dagegen erklären Klimamodelle, die natürliche und menschliche Ursachen beinhalten, den Klimawandel gut (vgl. Abb. 2). Die beste Abschätzung des vom Menschen verursachten Beitrags zur Erwärmung von 1951 bis 2010 entspricht laut IPCC in etwa der gesamten beobachteten Erwärmung.

Fazit:

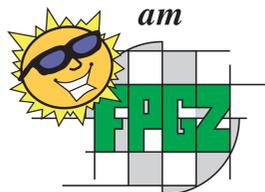
Die Klimawissenschaftler des Weltklimarats IPCC stellen in ihrem fünften Sachstandsbericht 2013 klar: »Es ist äußerst wahrscheinlich, dass der menschliche Einfluss die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts war.« Die Sicherheit in der Einschätzung hat gegenüber den Sachstandsberichten von 2007 und 2001 zugenommen, in denen noch von »sehr wahrscheinlich« bzw. von »wahrscheinlich« anstelle von »äußerst wahrscheinlich« die Rede war.



Klimawandel zum Anfassen

www.klimaausstellung.de

Verein für Schule und Umwelt am



Ferdinand-Porsche-Gymnasium Zuffenhausen

“Once above the ground, carbon constantly flows back and forth among vegetation, water, soils and air.”

Larry Lohmann, Klimaaktivist

Schätzen Sie!

Wie viel Kohlenstoffdioxid entsteht, wenn man die 80 ml Benzin im ausgestellten Gefäß verbrennt? Betrachten Sie für die Antwort den ausgestellten Karton.

CO₂ entsteht beim Verbrennen

CO₂ ist das wichtigste Treibhausgas, dessen Konzentration der Mensch erhöht hat. Wann immer wir mit Kohle, Erdöl oder Erdgas heizen, mit Diesel, Benzin, Super oder Gas Auto fahren, eine Flugreise unternehmen oder aus fossilen Brennstoffen gewonnenen Strom nutzen, entsteht dabei das unsichtbare Treibhausgas Kohlenstoffdioxid, dessen Gehalt in der Atmosphäre dadurch zunimmt.

Immer mehr Kohlenstoffdioxid

Die Menschen stoßen immer mehr CO₂ aus, hauptsächlich, weil Wirtschaft und Bevölkerung wachsen (Abb. 1).

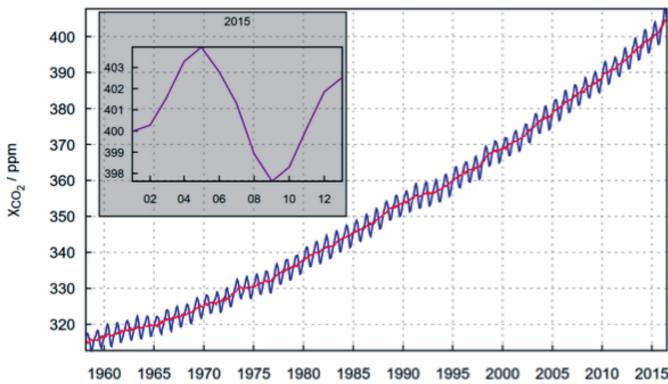


Abb. 1: Der Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Atmosphäre in den Jahren 1958 bis 2015.

Am Mauna-Loa-Observatorium auf Hawaii wird seit vielen Jahrzehnten der Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Luft gemessen. Der Kohlenstoffdioxid-Gehalt nimmt im Jahresmittel kontinuierlich zu, schwankt jedoch mit der Jahreszeit, weil während des Sommers auf der Nordhalbkugel Pflanzen viel CO₂ aufnehmen. (vgl. eingebundene Graphik rechts oben).

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Mauna_Loa_Carbon_Dioxide.svg

Die Konzentration von CO₂ wird in ppm (part per million = Teile pro Million) gemessen und gibt an, wie viele CO₂-Moleküle sich unter einer Million Luftmoleküle befinden. Die atmosphärische Konzentration an CO₂ hat sich wie folgt entwickelt:

- ▶ Sie ist von einem vorindustriellen Wert von etwa 280 ppm auf über 400 ppm im Jahr 2016 angestiegen.
- ▶ Sie hat in den letzten Jahren durchschnittlich um 2,3 ppm pro Jahr zugenommen.
- ▶ Sie übertrifft die aus Eisbohrkernen bestimmte natürliche Bandbreite der letzten 800.000 Jahre (190 bis 300 ppm) bei weitem (Abb. 2). Es gab auch schon Zeiten in der Erdgeschichte mit höherem CO₂-Gehalt: Z. B. lag im gesamten Erdmittelalter von 265–65 Millionen Jahren die CO₂-Konzentration bei über 1000 ppm. Allerdings war die Erde damals sehr warm, weitgehend eisfrei und der Meeresspiegel lag um mehrere Zehnermeter höher als heute.
- ▶ In jedem Kubikmeter Luft befinden sich inzwischen zwei Trinkgläser reines Co₂.

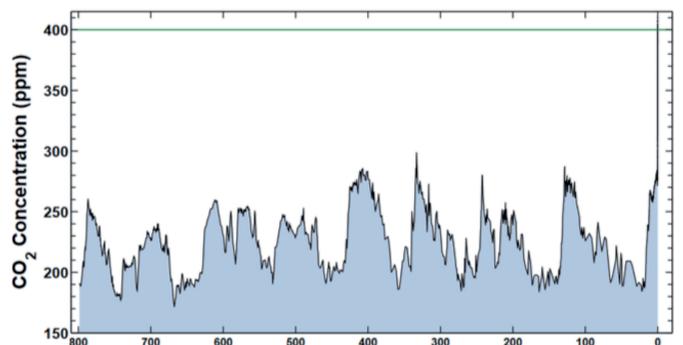
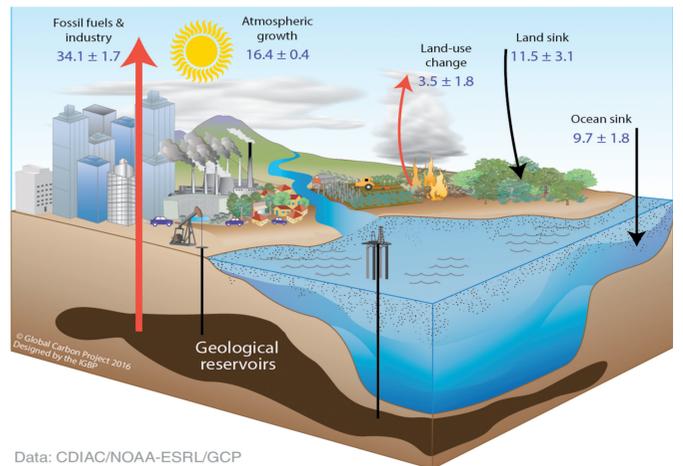


Abb. 2: Die CO₂-Konzentration der letzten 800 000 Jahre. Die Abbildung zeigt die atmosphärische CO₂-Konzentration im Wechsel von Kalt- und Warmzeiten und am rechten Rand den vom Menschen verursachten jüngsten Anstieg auf ca. 400 ppm im Mai 2017. In den Warmzeiten war die CO₂-Konzentration stets höher als in den Kaltzeiten, überschritt jedoch nie den Wert von 300 ppm. Mit Beginn der Industrialisierung stieg sie rasant auf inzwischen deutlich über 400 ppm an, ein Wert, der wahrscheinlich in den letzten 20 Millionen Jahren nicht erreicht wurde. Der angegebene Link liefert stets einen aktuellen CO₂-Wert.

Quelle: https://scrippsco2.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-bluemoon/graphs/co2_800k.png

Weniger als die Hälfte der CO₂-Emissionen der letzten Jahre sind in der Atmosphäre verblieben. Den Rest haben zu ähnlich großen Anteilen die Vegetation und die Ozeane aufgenommen, wobei letztere dadurch saurer geworden sind (Abb. 3 und Station 17).



Data: CDIAC/NOAA-ESRL/GCP

Abb. 3: Das globale CO₂-Budget.

Dargestellt sind die jährlichen CO₂-Stoffströme in Mrd. t für das Mittel der Jahre 2006-2015. Die Verbrennung fossiler Rohstoffe und industrielle Prozesse verursachen ca. 34 Mrd. t CO₂, das Roden tropischer Regenwälder und andere Landnutzungsänderungen etwa 3,5 Mrd. t CO₂.

<http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/16/presentation.htm>

Verstärkt das Atmen den Treibhauseffekt?

Mit jedem Atemzug stoßen wir Menschen CO₂ aus. Dieses entsteht im Körper bei der Gewinnung von Energie aus zuvor aufgenommener Nahrung. Dieses CO₂ befindet sich in einem kurzen Kreislauf, denn Pflanzen hatten es zuvor aus der Luft aufgenommen, umgewandelt und z. B. als Zucker, Stärke oder Fett gespeichert. Atmen führt deshalb anders als das Verbrennen fossiler Brennstoffe nicht zu einem Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre.

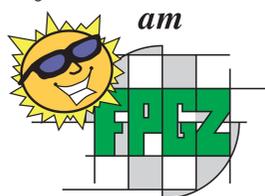
Fazit:

Das Treibhausgas CO₂ entsteht beim Verbrennen fossiler Energieträger. Seine Konzentration in der Atmosphäre ist von einem vorindustriellen Wert von 280 ppm auf über 400 ppm im Jahr 2016 angestiegen, dem wahrscheinlich höchsten Wert seit mindestens 20 Millionen Jahren.

Klimawandel
zum Anfassen

www.klimaausstellung.de

Verein für Schule und Umwelt
am



Ferdinand-Porsche-Gymnasium Zuffenhausen

„Das Verhalten von Wasserdampf und Bewölkung im Klimasystem ist so teuflisch vertrackt, dass es Wissenschaftler immer wieder in erbitterte Kontroversen und mitunter an den Rand des Wahnsinns treibt. ... Man sollte sich vor simplen Zusammenhängen zwischen Wärme, Verdunstung, Wolkenbildung und Treibhauseffekten hüten wie vor schwarzen Mambas.“

Hans Joachim Schellnhuber, Klimaforscher

Versuch:

Trocknen Sie das grüne Tuch mit dem Föhn! Wie wird es am schnellsten trocken?

Das Treibhausgas Wasserdampf verstärkt den Treibhauseffekt

Mehr Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre heizt die Luft auf. Um ein Grad erwärmte Luft kann sieben Prozent mehr Wasserdampf enthalten. Das Problem dabei:

Auch Wasserdampf wirkt als Treibhausgas und das heizt die Erde weiter auf. Man spricht von einer verstärkenden oder positiven Rückkopplung im Klimasystem.

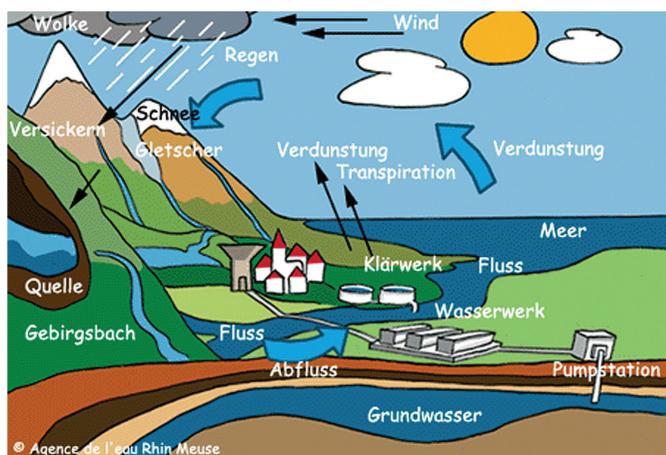


Abb. 1: Der Wasserkreislauf.

Quelle: <https://www.sonnentaler.net/aktivitaeten/oeekologie/umwelt/wasserkreislauf/wozu.html>

Die Rolle der Wolken bei der Erderwärmung

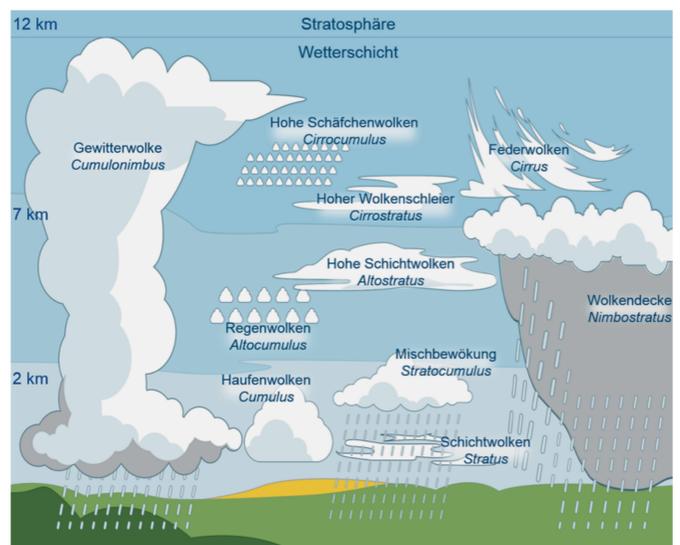


Abb. 2: Wolkenarten.

Quelle: Abgeleitet von Cloud_types_de.svg: Valentin de Bruyn / Cotton abgeleitet von Furfur - Cloud types en.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23937887>

Mehr Wasserdampf in der Luft kann zu mehr Bewölkung führen, mit zwei entgegengesetzten Wirkungen:

- ▶ Die Wassertröpfchen und Eiskristalle der Wolken wirken wie Treibhausgase, dadurch wird es wärmer.
- ▶ Aber sie hemmen die Erderwärmung auch, indem sie einen Teil des Sonnenlichts zurück ins Weltall reflektieren. Dadurch erreicht weniger Sonnenlicht die Erdoberfläche und diese heizt sich weniger stark auf. Dies ist eine dämpfende, **negative Rückkopplung**. Je nachdem, welcher Effekt vorherrscht, verstärken oder dämpfen Wolken den Treibhauseffekt:
- ▶ **Hohe Wolken**, die Zirren, lassen Sonnenlicht gut durch, absorbieren aber Wärmestrahlung. Sie **verstärken tendenziell den Treibhauseffekt**. Dies gilt auch für die **Kondensstreifen** von Flugzeugen (Station 31).
- ▶ **Tiefe, dicke Wolken** dämpfen eher den Treibhauseffekt (Abb. 2). Alle Wolkenarten zusammen bewirken wahrscheinlich eine zusätzliche Erwärmung. Die Wolken sind jedoch der größte Unsicherheitsfaktor bei der Abschätzung des zukünftigen Klimawandels.

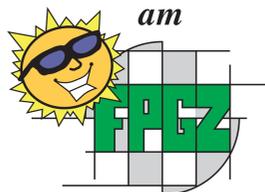
Fazit:

Wird es wärmer, kann die Luft mehr Wasserdampf enthalten, der seinerseits als Treibhausgas die Erwärmung verstärkt (**Selbstverstärkungseffekt**). Hohe Wolken verstärken ebenfalls den Treibhauseffekt, tiefe dämpfen ihn.

Klimawandel
zum Anfassen

www.klimaausstellung.de

Verein für Schule und Umwelt
am



Ferdinand-Porsche-Gymnasium Zuffenhausen

wird es wärmer

„Die globale Erwärmung ist so schwerwiegend und so dringlich, weil das große irdische System, Gaia, in einem Teufelskreis positiven Feedbacks gefangen ist. Zusätzliche Wärme aufgrund jedweder Ursache, ... , wird verstärkt, und das hat mehr als nur additive Auswirkungen.“

Tim Flannery, australischer Wissenschaftler und Autor



Versuch:

Sie sehen ein angestrahltes Geländemodell mit einer teilweise vergletscherten Landschaft. Messen Sie die Temperatur über dem hellen Gletscher und über den dunklen Flächen!



Abb. 1: Gletscher in den Alpen nahe dem Ortler.
Foto: Barais

■ Unterschiedlich starke Reflexion und ihre Folgen:

Helle Flächen wie Schnee und Eis (Abb. 1) haben ein hohes Rückstrahlvermögen (Albedo, Abb. 2): Sie reflektieren einen großen Teil des einfallenden Sonnenlichts zurück ins Weltall und absorbieren entsprechend wenig, so dass es weniger warm wird. Deshalb streichen die Menschen im Mittelmeerraum auch oft ihre Häuser weiß.

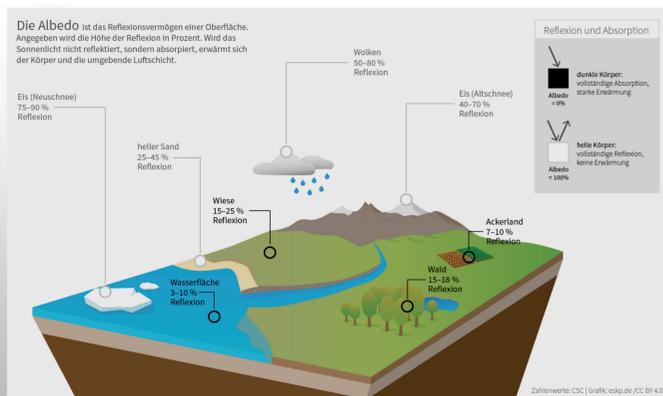


Abb. 2: Die Albedo verschiedener Oberflächen.

By esp.de (Wissensplattform "Erde und Umwelt", esp.de) [CC BY 4.0], via Wikimedia Commons https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c1/Albedo-R%C3%BCckstrahlung_Infografik.png

■ Ein Selbstverstärkungseffekt:

Schmelzen infolge der Erderwärmung in den Polargebieten und Hochgebirgen Schnee und Eis, treten vom Weltall aus dunkel erscheinendes Meerwasser oder Gestein zutage. Beide streuen weniger Sonnenlicht zurück. Dadurch wird es noch wärmer (Eis-Albedo-Rückkopplung). Auch deshalb sind die durchschnittlichen Temperaturen in der Arktis in den letzten hundert Jahren doppelt so schnell gestiegen wie im globalen Mittel.

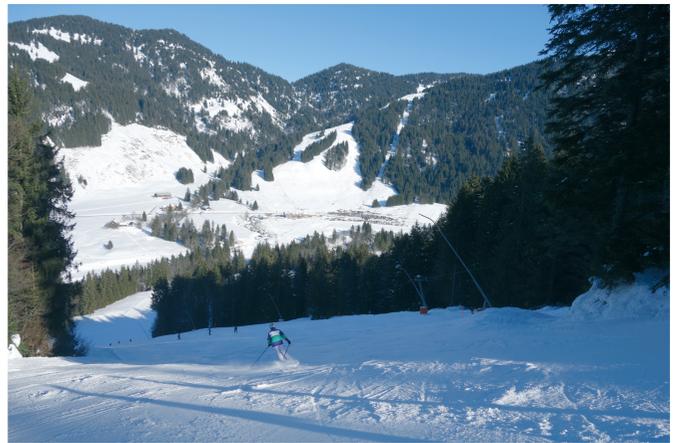


Abb. 3: Schneeflächen haben eine hohe Albedo, Nadelwälder wirken dagegen erwärmend.
Foto: Barais

Schadet Aufforstung?

Wälder binden Kohlenstoff, deshalb gelten Aufforstungen oft als Beitrag zum Klimaschutz. Wälder sind jedoch dunkel. Computersimulationen deuten darauf hin, dass außerhalb der Tropen bei Aufforstungen der Albedo-Effekt dominiert und es eher zu einer weiteren Erwärmung als zur Abkühlung kommt. In den Tropen sorgt Aufforstung dagegen für besonders viele dichte Wolken und damit für Abkühlung.

■ Wie stark wirkt CO₂ samt seinen Rückkopplungen als Treibhausgas?

Doppelt so viel Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre würde bei sonst unveränderten Bedingungen die Erdoberfläche im Mittel um ca. 1,2°C erwärmen. Berücksichtigt man die Rückkopplungen im Klimasystem, insbesondere die Wasserdampf-, die Wolken- und die Schnee-Albedo-Rückkopplung, wird es im globalen Durchschnitt wahrscheinlich zwischen 1,5°C und 4,5°C wärmer (Klimasensitivität des Kohlendioxids). Würden wir den CO₂-Gehalt der Atmosphäre im Vergleich zum Wert des 18. Jahrhunderts auf 560 ppm verdoppeln, müssten wir also damit rechnen, dass es zeitverzögert im globalen Mittel um etwa 3°C wärmer werden würde. Weil wir Menschen auch die Konzentration anderer Treibhausgase erhöht haben, wird es bereits bei einer CO₂-Konzentration von ca. 450 ppm langfristig um drei Grad wärmer. Bleibt der globale CO₂-Ausstoß unverändert hoch, würden wir diese Konzentration etwa im Jahr 2040 erreichen.

Fazit:

Schmelzen Schnee und Eis, treten vom Weltall aus dunkel erscheinendes Meerwasser oder Gestein zutage. Beide streuen weniger Sonnenlicht zurück und es wird noch wärmer (ein weiterer Selbstverstärkungseffekt). Bei einer Verdoppelung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre wird es langfristig im globalen Mittel um rund drei Grad wärmer.



Klimawandel
zum Anfassen



www.klimaausstellung.de

Verein für Schule und Umwelt
am



Ferdinand-Porsche-Gymnasium Zuffenhausen