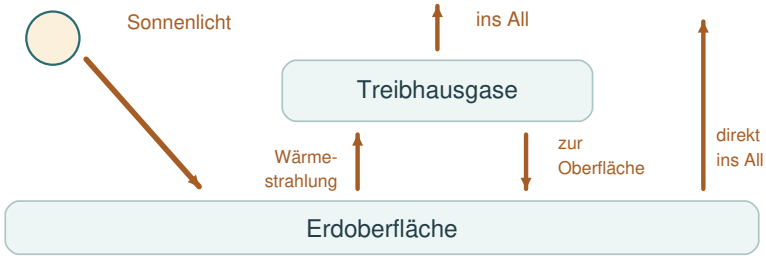
01 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Luft und Strahlung bestimmen die Energiebilanz

An einem sonnigen Tag erwärmt sich ein dunkler Stein. Seine Oberfläche nimmt Strahlung auf und gibt zugleich Wärmestrahlung ab. Ähnliche Vorgänge verbinden die Erdoberfläche mit der Atmosphäre und dem Weltraum.



Vereinfachte Strahlungswege: Sonnenlicht gelangt zur Erde, die Oberfläche gibt Wärmestrahlung ab. Treibhausgase nehmen einen Teil auf und strahlen in verschiedene Richtungen. Pfeilbreiten zeigen keine Energiemengen.

1 · Wetter und Klima auf verschiedenen Zeitskalen

Wetter beschreibt den momentanen Zustand der Atmosphäre: etwa Temperatur, Wind, Bewölkung und Niederschlag. **Klima** beschreibt die typischen Bedingungen und ihre Schwankungen über längere Zeiträume. Dafür werden viele Beobachtungen gemeinsam ausgewertet.

Ein kühler Tag gehört zur kurzfristigen Wettervielfalt. Für eine Aussage zur langfristigen Entwicklung betrachten Forschende lange Messreihen und große Gebiete. Auch Meereswärme, Eismassen und andere Größen helfen, Veränderungen des gesamten Klimasystems zu erkennen.

2 · Die Atmosphäre ist ein Gasgemisch

Trockene Luft enthält ungefähr 78 % Stickstoff und 21 % Sauerstoff. Der übrige Anteil besteht überwiegend aus Argon sowie kleinen Mengen weiterer Gase. **Wasserdampf** kommt in veränderlichen Anteilen hinzu. Auch Gase mit kleinen Anteilen können wichtige Wirkungen besitzen. Der Prozentanteil beschreibt ihre Häufigkeit; die Wirkung hängt zusätzlich von den Eigenschaften der jeweiligen Moleküle ab.

Sonnenstrahlung wird teilweise von Wolken, Luftteilchen und hellen Oberflächen zurückgeworfen. Das Rückstrahlvermögen heißt **Albedo**. Der aufgenommene Anteil erwärmt Land, Wasser und Atmosphäre. Die Erde gibt Energie in Form von Wärmestrahlung an den Weltraum ab.

3 · Treibhausgase verändern die Strahlungswege

Wasserdampf, CO_2 und Methan gehören zu den **Treibhausgasen**. Sie nehmen bestimmte Bereiche der Wärmestrahlung auf und senden selbst Strahlung in verschiedene Richtungen aus, auch zur Oberfläche. So beeinflussen sie die Temperaturen nahe dem Boden.

Steigt die Treibhausgaskonzentration, verändert sich zunächst die Abgabe von Energie ins All. Das Klimasystem erwärmt sich, bis die Energieabgabe wieder stärker wird. Der **Treibhauseffekt** beschreibt diese Strahlungswirkung. Ein einfaches Schichtmodell macht einen Teil des Zusammenhangs sichtbar.

Das gehört zusammen: Luftzusammensetzung und Strahlungseigenschaften beeinflussen die Energiebilanz. Langfristige Veränderungen werden durch viele Messungen und das Zusammenspiel mehrerer Prozesse erklärt.

Vergleiche „Woraus besteht Luft?“ mit „Treibhauseffekt & Gase“. Ändere im Strahlungsmodell jeweils nur Albedo oder Absorption und beobachte die Modelltemperatur.

01 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Ein kleiner Luftanteil kann eine große Wirkung haben

Eine Änderung der Strahlungsbilanz

1. Mehr wirksame Treibhausgase
Die Abgabe von Wärmestrahlung ins All verändert sich zunächst.

→

2. Energie sammelt sich an
Aufnahme und Abgabe sind vorübergehend nicht ausgeglichen.

→

3. Das System erwärmt sich
Mit steigender Temperatur nimmt auch die Wärmeabstrahlung zu.

Qualitative Wirkungskette; Rückkopplungen und die Trägheit der Ozeane sind zusammengefasst.

Die häufigsten Luftmoleküle sind Stickstoff und Sauerstoff. Ihre große Häufigkeit bedeutet aber nicht, dass sie dieselbe Wirkung auf Wärmestrahlung haben wie CO_2 oder Wasserdampf. **Moleküle besitzen unterschiedliche Eigenschaften.** Treibhausgase können bestimmte Bereiche der von der Erde abgegebenen Strahlung aufnehmen und selbst wieder abstrahlen. Deshalb sind Zusammensetzung und Wirkung zwei verschiedene Fragen. Ein Diagramm mit Prozentanteilen allein erklärt noch nicht den Treibhauseffekt.

Für die Energiebilanz kannst du die Erde gedanklich als Ganzes betrachten. Sonnenenergie kommt an, ein Teil wird reflektiert, und ein Teil wird aufgenommen. Gleichzeitig gelangt Wärmestrahlung ins All. Über längere Zeit bestimmt das Verhältnis von Aufnahme und Abgabe, ob sich Energie im Klimasystem ansammelt. Erhöhte Treibhausgasmengen verändern zunächst die Abgabe; die anschließende Erwärmung beeinflusst sie wiederum. Die **Albedo** wirkt an einer anderen Stelle: Sie verändert den zurückgeworfenen Anteil des Sonnenlichts. Für eine Erklärung können diese Einflüsse zunächst getrennt untersucht werden. Das hilft beim Erklären, bedeutet aber nicht, dass Wolken, Wasserdampf, Eis und Temperatur in der wirklichen Atmosphäre unabhängig voneinander bleiben. Sie sind miteinander verbunden und können sich gegenseitig beeinflussen.

Bei einer **Rückkopplung** wirkt eine Folge auf die anfängliche Veränderung zurück. Erwärmung ermöglicht mehr Wasserdampf in der Atmosphäre; als Treibhausgas kann er die Erwärmung verstärken. Weniger helles Eis kann ebenfalls mehr Aufnahme von Sonnenlicht bewirken. Dagegen gibt eine wärmere Erde mehr Wärmestrahlung ab, was die Energieansammlung begrenzt. Forschende betrachten diese Wirkungen gemeinsam. Verstärkend bedeutet dabei nicht, dass eine Veränderung unbegrenzt weiterlaufen muss.

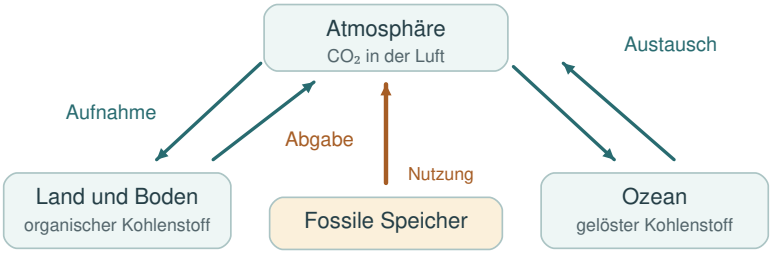
Zwei Regler, zwei Wirkungen
Erhöhe im Modell nur die Albedo: Mehr Sonnenlicht wird zurückgeworfen. Erhöhe in einem getrennten Vergleich nur die Absorption von Wärmestrahlung: Du veränderst die Strahlungswirkung der Modellschicht. Die Regler greifen an unterschiedlichen Stellen der Bilanz an und dürfen nicht als dieselbe Ursache bezeichnet werden.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Ein Gas mit kleinem Prozentanteil kann das Klima kaum beeinflussen.
So stimmt es: Die Wirkung hängt neben der Menge von den Strahlungseigenschaften ab. Auch ein geringer Anteil eines wirksamen Treibhausgases kann die Energiebilanz verändern.

02 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Kohlenstoff verbindet Luft, Land und Meer

Ein Kohlenstoffatom kann in einem CO_2-Molekül der Luft, in einem Blatt oder in einer gelösten Verbindung im Meer vorkommen. Der Kohlenstoffkreislauf verfolgt seine Wege und erklärt, warum manche Speicher wachsen und andere kleiner werden.



Ausgewählte Kohlenstoffspeicher und Transfers. Doppelte Pfeile zeigen Austausch in beide Richtungen. Fossile Nutzung verschiebt Kohlenstoff aus einem langfristigen Speicher in die Atmosphäre.

4 · Speicher und Flüsse unterscheiden

Ein **Kohlenstoffspeicher** enthält eine bestimmte Kohlenstoffmenge. Dazu zählen Atmosphäre, Lebewesen, Böden, Ozeane und Gesteine. Ein **Fluss** beschreibt, wie viel Kohlenstoff in einer bestimmten Zeit zwischen Speichern übertragen wird.

Pflanzen nehmen CO_2 bei der Fotosynthese auf und bauen daraus organische Stoffe. Zellatmung, Abbau und Verbrennung bringen Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre. Manche Wege dauern Tage oder Jahre, andere geologische Zeiträume. Ein Speicher kann gleichzeitig Kohlenstoff aufnehmen und abgeben. Für eine Bilanz müssen beide Richtungen und derselbe Zeitraum berücksichtigt werden.

5 · Zusätzliche Emissionen verändern die Bilanz

Bei der Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas wird lange gespeicherter Kohlenstoff als CO_2 freigesetzt. Auch Veränderungen der Landnutzung beeinflussen die Speicher. **Emissionen** sind solche Freisetzungen. Eine **Senke** nimmt insgesamt mehr auf, als sie im betrachteten Zeitraum abgibt.

Land und Ozeane nehmen einen Teil der zusätzlichen Emissionen auf. Der übrige Anteil erhöht die CO_2-Menge in der Luft. Der menschliche Einfluss ist die Hauptursache der gegenwärtigen globalen Erwärmung. Die Bilanz verbindet deshalb Kohlenstoffflüsse mit der Strahlungswirkung der Atmosphäre.

6 · Der Ozean nimmt Kohlenstoff auf

Zwischen Luft und Oberflächenwasser wird CO_2 in beide Richtungen ausgetauscht. Gelöstes CO_2 reagiert mit Wasser; dabei verändern sich die Anteile verschiedener gelöster Kohlenstoffverbindungen. Eine erhöhte CO_2-Aufnahme kann den pH-Wert des Meerwassers senken. Das heißt **Ozeanversauerung**.

Plankton nutzt Kohlenstoff für den Aufbau organischer Stoffe. Ein Teil gelangt mit absinkenden Partikeln in tiefere Wasserschichten. Strömungen verbinden die Speicher. Aufnahme und Speicherung hängen unter anderem von Temperatur, Durchmischung und biologischen Vorgängen ab.

Das gehört zusammen: Für die CO_2-Menge zählt die Bilanz aller Zu- und Abflüsse. Der Ozean und Landökosysteme verbinden chemische, biologische und physikalische Vorgänge.

Öffne „Kohlenstoffkreislauf“. Vergleiche zwei Modellläufe mit verschiedenen fossilen Emissionen und gleichen übrigen Einstellungen. Beobachte mehrere Modelljahre und die Veränderung der Speicher.

02 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Speicher und Flüsse wie eine Bilanz lesen

Drei verschiedene Aussagen zur Bilanz

Speicher
Wie viel Kohlenstoff befindet sich jetzt in einem Bereich?

Fluss
Wie viel gelangt pro Jahr hinein oder hinaus?

Änderung
Zuflüsse minus Abflüsse bestimmen die Speicheränderung.

Das Schema gilt für denselben Zeitraum und ein klar abgegrenztes Reservoir.

Eine Badewanne hilft beim Unterscheiden von **Speicher** und **Fluss**. Die enthaltene Wassermenge entspricht einem Speicher. Zufluss und Abfluss beschreiben Mengen pro Zeit. Der Wasserstand steigt, wenn mehr hineinfließt als abläuft, selbst wenn der Abfluss bereits groß ist. Beim Kohlenstoff funktioniert die Bilanz ähnlich: Für die Atmosphäre zählt die Differenz zwischen Aufnahme und Abgabe. Große natürliche Austauschflüsse können gleichzeitig stattfinden und sich weitgehend ausgleichen. Ein zusätzlicher menschlicher Zufluss kann diese Bilanz verschieben.

Eine geringere jährliche Emission bedeutet daher nicht automatisch, dass die Menge in der Luft sofort sinkt. Sie steigt weiter, solange die gesamten Zuflüsse größer bleiben als die gesamten Abflüsse. Auch **Kohlenstoff und Kohlenstoffdioxid** darfst du nicht als gleiche Masse behandeln: Ein CO_2-Molekül enthält neben Kohlenstoff zwei Sauerstoffatome. Die Einheit Gt C bezeichnet Milliarden Tonnen Kohlenstoff. Im Ozean wird aufgenommener Kohlenstoff außerdem chemisch umgewandelt und zwischen Wasserschichten transportiert. Eine zunehmende CO_2-Aufnahme kann den pH-Wert senken. „Versauerung“ beschreibt diese Abnahme; sie bedeutet nicht, dass das Meer dadurch überall bereits einen pH-Wert unter 7 besitzt. So verbinden sich Bilanz, Molekülaufbau und Ökosysteme miteinander.

Für Klimaschutz zählt bei langlebigem CO_2 auch die über viele Jahre aufsummierte Freisetzung. Ein Teil des zusätzlich eingebrachten Kohlenstoffs bleibt lange im Klimasystem. Wiederaufforstung kann Kohlenstoff speichern, solange der Speicher wächst und erhalten bleibt; Feuer, Abbau oder Rodung können ihn wieder freisetzen. Eine natürliche Senke ist deshalb kein unbegrenzt verfügbarer Ausgleich für fortgesetzte Emissionen. Dauer und Größe der Speicherung müssen mit der Freisetzung verglichen werden.

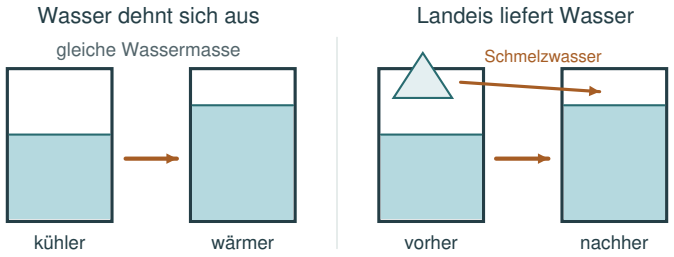
Weniger Zufluss reicht nicht immer
In eine Modellwanne fließen 8 Liter pro Minute hinein und 5 Liter hinaus. Der Inhalt wächst um 3 Liter pro Minute. Wird der Zufluss auf 6 Liter verringert, wächst er noch um 1 Liter pro Minute. Weniger Zuwachs ist etwas anderes als ein sinkender Inhalt.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Wenn die Emissionen sinken, sinkt die CO_2-Menge sofort mit.
So stimmt es: Die Menge sinkt erst, wenn die gesamten Abflüsse die Zuflüsse übersteigen. Kleinere zusätzliche Emissionen können zunächst nur den weiteren Anstieg bremsen.

03 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Veränderungen verstehen und begründet handeln

Zusätzliche Energie verteilt sich im Klimasystem auf Luft, Land, Wasser und Eis. Die Folgen entstehen auf unterschiedlichen Wegen und Zeitskalen. Messungen und Modelle helfen, sie zu erklären.



Zwei wichtige Beiträge zum Meeresspiegelanstieg: Erwärmtes Meerwasser nimmt mehr Raum ein; schmelzendes Landeis fügt Wasser hinzu. Schematische Gefäße und stark vergrößerte Höhenänderungen.

7 · Erwärmung beeinflusst den Meeresspiegel

Beim Erwärmen braucht dieselbe Meerwassermasse mehr Raum. Diese **thermische Ausdehnung** lässt den Meeresspiegel steigen. Zusätzlich gelangt Wasser aus schmelzenden Gletschern und Eisschilden an Land in den Ozean.

Schwimmendes Meereis verdrängt bereits Wasser. Sein Schmelzen hat daher einen sehr kleinen direkten Einfluss auf den Meeresspiegel. Der Eisverlust verändert aber die Albedo: Dunkleres Wasser nimmt mehr Sonnenstrahlung auf.

8 · Rückkopplungen verbinden Ursache und Wirkung

Eine **Rückkopplung** wirkt auf ihren eigenen Auslöser zurück. Weniger helles Eis begünstigt die Aufnahme von Sonnenenergie und weitere Erwärmung. Ein erwärmter Körper gibt zugleich mehr Wärmestrahlung ab; das wirkt der zusätzlichen Energieaufnahme entgegen.

Auch Wasserdampf und Wolken wirken mit. Solche Vorgänge können eine anfängliche Veränderung verstärken oder abschwächen. Ihre gemeinsame Wirkung wird untersucht. Modellrechnungen beruhen auf bestimmten Annahmen. Forschende vergleichen die Ergebnisse mit Beobachtungen und geben Unsicherheiten an.

9 · Messreihen und Entscheidungen verbinden

Eine **Temperaturanomalie** ist die Abweichung von einem Vergleichsmittel. Zu einer Klimagrafik gehören Zeitraum, Bezugszeitraum, Einheit und Datenquelle. Langfristige Trends erkennt man besser über viele Jahre als an einzelnen Höchst- oder Tiefstwerten.

Klimaschutz verringert die Ursachen zusätzlicher Erwärmung, etwa durch weniger Treibhausgasemissionen. **Anpassung** richtet sich auf veränderte Bedingungen, etwa durch Schattenflächen oder Wasserrückhalt. Beide verbinden naturwissenschaftliche Erkenntnisse mit Entscheidungen über Energie, Landnutzung und Lebensräume.

Das gehört zusammen: Strahlung verändert die Energiebilanz. Energieaufnahme beeinflusst Wasser, Eis und Lebewesen. Messreihen und Modelle verbinden diese Vorgänge mit möglichen Entscheidungen.

Fachbücher und Quellen stehen auf Seite 7. Die Onlinefassung verlinkt außerdem die passenden Lehrbuchkapitel.

03 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Messkurven lesen und Folgen miteinander verbinden

Drei Blickwinkel auf Klimaänderungen

Temperaturreihe
Viele Jahre zeigen Schwankungen und einen längerfristigen Verlauf.

Meeresspiegel
Wasser dehnt sich aus; schmelzendes Landeis liefert zusätzlich Wasser.

Handlung
Klimaschutz mindert Ursachen; Anpassung verringert Folgen.

Die Kästen vergleichen Beobachtung, Mechanismus und Handlung; sie sind keine zeitliche Abfolge.

Eine Klimakurve zeigt oft **Abweichungen von einem Vergleichsmittel**. Ein Wert von +1 °C bedeutet dann nicht, dass die Erde insgesamt 1 °C warm ist. Er bedeutet, dass der betrachtete Mittelwert um 1 °C über dem angegebenen Bezugswert liegt. Zwei Kurven mit verschiedenen Bezugszeiträumen können deshalb unterschiedliche Zahlen zeigen und dennoch eine ähnliche Erwärmung beschreiben. Zum Lesen gehören immer Gebiet, Zeitraum, Einheit und Bezug. Eine globale Temperaturreihe kann beispielsweise auf den Zeitraum 1951-1980 bezogen sein.

Ein gleitendes Mittel macht längerfristige Veränderungen leichter sichtbar, weil mehrere Jahre gemeinsam betrachtet werden. Es entfernt aber nicht die physikalischen Ursachen einzelner Schwankungen. Ebenso unterscheidest du **Beobachtung und Modell**: Eine gemessene Temperaturkurve dokumentiert frühere Werte; eine Simulation untersucht Folgen bestimmter Annahmen. Ein wärmerer Ozean kann beispielsweise durch Ausdehnung zum Meeresspiegelanstieg beitragen, während schmelzendes Landeis zusätzlich Wasser zuführt. Die Vorgänge verstärken sich im Ergebnis, haben aber unterschiedliche Mechanismen. Aus solchen Zusammenhängen entstehen zwei Arten von Maßnahmen: Ursachen weiterer Erwärmung verringern und mit bereits veränderten Bedingungen umgehen. Eine begründete Erklärung nennt den Mechanismus, auf den sich die Maßnahme richtet, statt allein ein Schlagwort zu verwenden.

Der Ozean nimmt viel zusätzliche Energie auf und reagiert wegen seiner großen Wärmekapazität langsam. Deshalb können Folgen noch weiterlaufen, obwohl sich ein Antrieb bereits verändert hat. Außerdem verteilt sich Erwärmung räumlich ungleich. Ein globaler Mittelwert beschreibt nicht jede Region und jede Jahreszeit. Zu einer sorgfältigen Aussage gehören deshalb auch regionale Beobachtungen, zeitliche Verzögerungen und Unsicherheiten. Unsicherheit bedeutet eine begrenzte Genauigkeit, nicht das Fehlen aller gesicherten Zusammenhänge.

Schatten oder weniger Emissionen?
Ein Baum auf dem Schulhof kann Schatten spenden und die Hitzebelastung vor Ort verringern. Weniger fossile Energie zu verbrauchen vermindert zusätzliche Treibhausgasemissionen. Beide Maßnahmen können sinnvoll sein, greifen aber an unterschiedlichen Stellen an: bei örtlichen Folgen beziehungsweise bei Ursachen weiterer Erwärmung.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Ein kaltes Jahr widerlegt einen langfristigen Erwärmungstrend.
So stimmt es: Einzelne Jahre schwanken. Für einen Trend müssen längere Zeiträume und ausreichend große Gebiete gemeinsam untersucht werden.

Wissen anwenden und weiterdenken

Drei ergänzende Entdeckeraufträge. Erkläre deine Beobachtungen mit den Zusammenhängen aus dem Wissenstext.

1 · Treibhauseffekt & Gase

Ausprobieren: Wähle „Natürliches Modellbeispiel“. Verändere zunächst nur die Albedo. Setze zurück und verändere dann nur die Absorption.

Beobachten: Vergleiche Modelltemperatur und Strahlungspfeile in beiden Versuchen.

Erklären: An welcher Stelle der Energiebilanz wirkt jeweils der veränderte Regler?

Modellgrenze: Das Schichtmodell ist keine Wettervorhersage. Seine Absorption wird nicht direkt aus dem CO_2-Regler des Luftmodells berechnet.

2 · Kohlenstoffkreislauf

Ausprobieren: Vergleiche nach „Zurücksetzen“ zwei Läufe mit verschiedenen fossilen Emissionen. Halte die übrigen Regler gleich und wähle jeweils „Zehn Modelljahre“.

Beobachten: Vergleiche die Änderung des Luftspeichers und die Gesamtmenge aller Speicher.

Erklären: Warum kann die Luftmenge auch bei kleineren Emissionen noch steigen?

Modellgrenze: Die Speicher und Flussgrößen sind vereinfachte Modellannahmen; sie ergeben keine genaue Zukunftsprognose.

3 · Temperatur & CO_2 im Zeitverlauf

Ausprobieren: Wähle „Temperatur ab 1880“. Vergleiche die Jahreswerte mit eingeschaltetem „10-Jahres-Mittel“ und lies die Bezugsperiode.

Beobachten: Unterscheide kurzfristige Ausschläge und längerfristigen Verlauf.

Erklären: Warum ist eine Temperaturanomalie keine absolute Temperaturangabe?

Modellgrenze: Die Ansicht zeigt archivierte Messreihen mit angegebenem Datenstand; das Mittel ist keine Vorhersage.

Interaktive Werkstatt öffnen →

Fachliche Quellen und weiterführende Literatur

Climate Change 2021: The Physical Science Basis
NASA, NOAA und OpenStax: Grundlagen des Klimasystems
NOAA · Klimasystem
NASA · Energiebilanz der Erde
NASA · Erwärmung der Ozeane
NASA · Wasserdampf als Rückkopplung