Biologie Jahrgangsstufe 13 im LehrplanPLUS
VI Ökologie und Biodiversität
2 Anthropogene Einflüsse auf Ökosysteme und der Wert der Biodiversität

Thomas Nickl, Dezember 2024; überarbeitet September 2025

Bitte lesen Sie meine allgemeinen Anmerkungen zur Jahrgangsstufe 13 zu den Aspekten: Materialien, didaktisch-methodische Hinweise, Kompetenzen, Berufsbilder. [docx] [pdf]

Zeitplan

VI Ökologie und Biodiversität

2 Anthropogene Einflüsse auf Ökosysteme und der Wert der Biodiversität
- 2.1 Biodiversität und Ökosystemleistungen
  - 2.1.1 Biodiversität
  - 2.1.2 Ökosystemleistungen
- 2.2 Ökonomische Kosten menschlicher Einflussnahme auf ein Ökosystem
  - 2.2.1 Treibhauseffekt (Schwerpunkt)
  - 2.2.2 Abholzung von tropischem Regenwald
  - 2.2.3 Maßnahmen *(wenn nicht anderswo integriert)*
- 2.3 Geldwert von Ökosystemen
  - 2.3.1 Monetarisierung von Ökosystemen
  - 2.3.2 Kosten-Nutzen-Betrachtung
  - 2.3.3 Vorteile und Grenzen der Monetarisierung
- 2.4 Ökosystem-Management
- 2.5 Bewertung aus unterschiedlichen Standpunkten
- *2.6 Ökologischer Fußabdruck (nur eA-Kurs)*

Zeitplan

Der LehrplanPLUS sieht für den Lernbereich 4.2 „Anthropogene Einflüsse auf Ökosysteme und der Wert der Biodiversität“ im grundlegenden Anforderungsniveau (gA) ca. 6 und im erweiterten Anforderungsniveau (eA) ca. 7 Unterrichtsstunden vor (alle Formulierungen für den gA-Kurs gelten auch für den eA-Kurs). Die folgende Tabelle zeigt einen Vorschlag für einen Zeitplan:

Nummer	Abschnitte	Stunden gA	Stunden eA
1	Biodiversität und Ökosystem-Leistungen	3,5	3,5
2	Ökonomische Kosten menschl. Einflussnahme		
3	Geldwert von Ökosystemen	1,5	1,5
4	Ökosystem-Management		
5	Bewertung aus unterschiedlichen Standpunkten	1	1
6	Ökologischer Fußabdruck	–	1
	Summe	**6**	**7**

VI Ökologie und Biodiversität

2 Anthropogene Einflüsse auf Ökosysteme und der Wert der Biodiversität

Es fällt mir schwer, durch die Lernbereiche 4.2 und 4.3 einen klar erkennbaren Roten Faden für ein didaktisches Konzept zu ziehen. Zudem treten bei manchen Aspekten Redundanzen auf (umgekehrt heißt das: durch geschicktes Zusammenlegen in der Unterrichtsplanung kann auch Zeit eingespart werden; Hinweise dazu in meinen Skripten). Ich stelle ein wenig um und versuche, sinnvolle Oberbegriffe zu finden, damit dieses Dilemma wenigstens ein bisschen abgemildert wird.

Die Kursteilnehmer sollen hier vergleichsweise wenige neue Fachbegriffe kennenlernen, dafür aber an mehreren Beispielen ihren Blick auf die Wechselwirkungen zwischen menschlicher Aktivität und Reaktionen der Ökosysteme schärfen sowie Denkmodelle zur Erfassung und Handhabung der sich daraus ergebenden Probleme kennenlernen. Ich sehe hier den Schwerpunkt nicht so sehr auf der Vermittlung von Fakten als vielmehr auf der schülerzentrierten Beschäftigung mit der Thematik, wobei die einzelnen Beispiele weitgehend austauschbar bleiben (Ausnahme: Treibhauseffekt). Hier ergibt sich viel Gelegenheit für eigene Recherche und kritische Beurteilung der verwendeten Quellen. Während Vermittlung neuer Sachkompetenzen hier also in den Hintergrund tritt, sollen in erster Linie prozessbezogene Kompetenzen eingeübt werden, nicht zuletzt als Vorbereitung auf das Abitur.

Ich sehe bei den Lernbereichen 4.2 und 4.3 eine besonders große Gefahr, dass die Kursteilnehmer meinen, viel zu viele Details auswendig lernen zu müssen. Dem ist von der Lehrkraft immer wieder mit größter Deutlichkeit gegenzusteuern, indem klar zwischen (wenig) Lerninhalt und (austauschbarem) Beispiel unterschieden wird. Die Kursteilnehmer sollten jeden vom LehrplanPLUS verlangten Lerninhalt mit einem (1) Beispiel erläutern bzw. einen unbekannten Fall anhand der Materialien nach den im LehrplanPLUS genannten Kriterien bearbeiten können (z. B. Ökodienstleistungen, Kosten-Nutzen-Betrachtung, Werteabwägung).

Gedanken zur Hinführung (fakultativ):

Alle Ökosysteme der Erde werden mittlerweile durch menschliche Aktivitäten beeinflusst, also in der Regel belastet. Weil diese Einflussnahme gewaltige Ausmaße angenommen hat, die u. a. einen dramatisch schnellen und dramatisch umfangreichen Artenschwund zur Folge haben, wurde vorgeschlagen, die Zeit ab 1950 (bzw. nach anderen Vorschlägen ab 1610 bzw. ab 1800) geochronologisch als neuen Abschnitt zu bezeichnen: das Anthropozän. 2024 wurde dieser Vorschlag von der International Commission on Stratigraphy abgelehnt, aus meiner Sicht zu Recht, denn geochronologische Zeiträume werden in Millionen Jahren gemessen, nicht in Jahrzehnten oder Jahrhunderten. Der massive Einfluss des Menschen stellt sich geochronologisch eher als Katastrophen-Ereignis dar, vergleichbar dem Einschlag eines Asteroiden vor 66 Millionen Jahren im Gebiet des heutigen Golf von Mexiko (ich bleibe bei der offiziellen Bezeichnung der Geographie!), der das Ende der Kreidezeit herbeiführte.

2.1 Biodiversität und Ökosystemleistungen

(ca. 3,5 Stunden für die Abschnitte 2.1 und 2.2, weil mit 2.2.1 ein Schwerpunkt gesetzt wird, der vor allem den Lernbereich 1 intensiv berücksichtigt)

Inhalte zu den Kompetenzen	***Kompetenzerwartungen:* Die Sch. …**
ökonomische Kosten menschlicher Einflussnahme auf ein Ökosystem u. a. Folgen des anthropogen bedingten Treibhauseffekts; Konzept der Ökosystemleistungen in verschiedenen Bereichen (regulierend, unterstützend, bereitstellend, kulturell); Bedeutung und Erhalt der Biodiversität	unterscheiden Bereiche, in denen der Mensch die Ressourcen von Ökosystemen nutzt und erklären die Bedeutung dieser Ökosystemleistungen für den Menschen.

Es erscheint mir sinnvoll, mit diesen Begriffen Biodiversität und Ökosystemleistungen zu beginnen, weil sie die Grundlage für die Diskussion zu den ökonomischen Kosten bilden.

Erklärvideo ***Mai Think X****, Folge 39: „Landwirtschaft: Wie unsere Ernährung die Natur zerstört“*
Der Konflikt zwischen Ernährungssicherheit und Schutz der Biodiversität (28:36)
https://www.zdf.de/show/mai-think-x-die-show/maithink-x-folge-39-landwirtschaft-wie-unsere-ernaehrung-die-natur-zerstoert-100.html (zdf-Mediathek)
Für Unterrichtszwecke gut geeignet ist der Ausschnitt „Gute Frage: Biodiversität – Was geht mich das an?“ (3:21-7:45). Aufgelockert durch komödiantische Elemente werden Ökosystemleistungen angesprochen, die stark von der Biodiversität abhängen. Wissenschaftliche Aussagen werden durch eingeblendete Quellennachweise belegt.

2.1.1 Biodiversität

Provokanter Einstieg: „Es ist mir völlig egal, ob auf einer fernen Insel der Pazifische Nasenbohrkäfer ausstirbt oder nicht!“

Drei Ebenen der Biodiversität:

- genotypische und dadurch bedingt auch phänotypische Variabilität innerhalb einer **Population**: wesentlich, damit bei einer langfristigen Veränderung der Ökofaktoren diejenigen Individuen bevorzugt zur Fortpflanzung kommen, die mit der neuen Lage besser zurecht kommen *(Vorwissen aus Genetik und Evolution Q12)* Unterschiedliche Gehäuse von Baumschnecken in Biosphäre, Seite 242, Abb. 2 sowie Diversität von Kohlsorten und Hausrindern auf Seite 243, Abb. 3.
- Vielfalt der **Arten**: je mehr Arten in einem Ökosystem leben, desto stabiler ist es, weil beim Ausfall einer Art andere Arten deren Aufgaben übernehmen können *(Vorwissen aus dem Lernbereich Dynamische Prozesse in Ökosystemen Q13)*
- Vielfalt der **Lebensräume**: je unterschiedlicher nah beieinander liegende Lebensräume sind, desto leichter finden Arten ein neues Zuhause, wenn sich die Ökofaktoren verändern

Biodiversität hat also eine hohe Bedeutung für die Stabilität wie auch für die Flexibilität von Ökosystemen, vor allem bei sich ändernden Ökofaktoren (z. B. durch den Klimawandel). Deshalb sollte dem Erhalt der Biodiversität auf allen drei Ebenen eine sehr hohe Priorität bei Entscheidungen über menschliche Aktivitäten eingeräumt werden.

Stabilität und Flexibilität erzeugen Resilienz (= Widerstandsfähigkeit) – ein Begriff, den der LehrplanPLUS zwar nicht nennt, der aber mittlerweile häufig verwendet wird und deshalb zumindest im Unterricht erwähnt werden sollte.

2.1.2 Ökosystemleistungen

Es ist Geschmacksfrage, ob man dafür die Abkürzung ÖSL verwenden will, wie von Buchner vorgeschlagen – man könnte ggf. eine despektierliche Bezeichnung für unsere österreichischen Nachbarn heraushören.

Der Mensch neigt dazu, alles auf sich zu beziehen (anthropozentrische Sichtweise), und betrachtet Ökosysteme deshalb gerne unter dem Aspekt der Leistungen, die sie für ihn erbringen, und weniger unter dem Aspekt des Lebensraumes für viele andere Lebewesen (wer denkt beim Schilanglauf querfeldein schon daran, dass er quasi durchs Wohn- und Schlafzimmer vieler Tiere fährt?). Dazu kommt die Entfremdung von der Natur in unserer Gesellschaft: So kommt Trinkwasser aus der Leitung, Nahrung wird im Supermarkt gekauft und unsere Atemluft ist in Deutschland seit Jahrzehnten insgesamt sauber (letzteres war beispielsweise in Bitterfeld, Sachsen-Anhalt, bis Ende der 1980er-Jahre ganz anders). Nur bei besonderen Gelegenheiten wie etwa einer Bergtour begegnen wir der Natur direkt. Deshalb werden Ökosystemleistungen meist unterschätzt bzw. gar nicht als Dienstleistungen, sondern als Selbstverständlichkeiten wahrgenommen. Es ist deshalb wichtig, im Unterricht auf die verschiedenen Formen der Ökosystemleistungen einzugehen.

Die Kursteilnehmer können im Brainstorming etliche Ökosystemleistungen benennen, um diese anschließend vier vorgegebenen Kategorien zuzuordnen (auch wenn es mir schwer fällt, unterstützende und regulierende Leistungen immer klar zu unterscheiden):

bereitstellende Ökosystemleistungen
Die Ökosysteme stellen Produkte bereit, die vom Menschen direkt genutzt werden wie z. B.:

- Obst, Gemüse, Getreide (Feldfrüchte)
- Honig
- Holz

unterstützende Ökosystemleistungen
Hierbei profitiert der Mensch nur indirekt, beispielsweise bei:

- Erfüllung wichtiger Bodenfunktionen als Voraussetzung für eine funktionierende Biozönose (z. B. Bodendurchlüftung, Abbau organischer Substanzen, Humusbildung)
- Bindung von Kohlenstoffdioxid z. B. in Mooren oder im Meer
- Artenvielfalt, die auch bei hohen Belastungen (Überschwemmung, Dürre) für Stabilität des Ökosystems sorgt
- Pflanzenwachstum als Grundlage für die gesamte Biozönose im Ökosystem
- Bergwald verhindert Abwaschung des Bodens, Abgang von Muren und Lawinen

regulierende Ökosystemleistungen
Auch von diesen Schutzfunktionen, die in Regelkreise eingebunden sind, profitiert der Mensch nur indirekt, z. B.:

- Filterwirkung des Bodens, wodurch sauberes Grundwasser gebildet wird
- Wasserspeicherung im Boden
- Filterwirkung der Vegetation, wodurch Partikel aus der Luft gefiltert werden
- Verdunstung durch Pflanzen sorgt für gute Luftfeuchtigkeit auch ohne Regen

kulturelle Ökosystemleistungen
Das sind Leistungen, die der Mensch direkt in Anspruch nimmt, um Erfahrungen, Erlebnisse, und Empfindungen daraus zu gewinnen, wie:

- Ästhetik (Schönheit der Natur)
- Erholung und Sport
- pädagogische Funktion

Die Kursteilnehmer sollen 2-3 Beispiele für jede dieser vier Formen nennen bzw. vorgegebene Ökosystemleistungen begründet der richtigen Kategorie zuordnen können. (Entscheidend ist die Plausibilität der Begründung, nicht so sehr dass die Zuordnung des Kursteilnehmers der des Erwartungshorizonts entspricht.)

Die Bedeutung der Artenvielfalt für Ökosystemleistungen ist bei Buchner, Seite 209, B3 dargestellt. Hier wird im Säulendiagramm der Beitrag zu neun Ökosystemleistungen in drei unterschiedlichen Biotopen (weitgehend natürliches Ökosystem, naturnahe Landbewirtschaftung, intensive Landbewirtschaftung) gezeigt.

2.2 Ökonomische Kosten menschlicher Einflussnahme auf ein Ökosystem

Der LehrplanPLUS verlangt durch die Formulierung „u. a." mindestens zwei Beispiele, darunter den Treibhauseffekt.

Menschliche Aktivitäten beeinflussen Ökosysteme direkt oder indirekt, zumeist in Form einer Belastung, selten durch Förderung. Ein geschädigtes (oder vernichtetes) Ökosystem stellt weniger (oder keine) Ökosystemleistungen zur Verfügung und schadet damit dem Menschen ökonomisch. Diese Rückwirkungen erfolgen direkt oder indirekt, sofort oder zeitlich verzögert. Sie stellen ein ökonomisches Argument gegen Ausbeutung und Raubbau in der Natur dar.

2.2.1 Treibhauseffekt

Der Klimawandel dürfte wohl das zentrale gesellschaftliche Thema des 21. Jahrhunderts darstellen. Er beruht auf dem Treibhauseffekt, über den zwar viel debattiert wird, dessen Zusammenhänge aber die wenigsten tatsächlich verstanden haben. Deshalb sollte an dieser Stelle ein ***Schwerpunkt*** *gesetzt werden. Das Thema hat eine hohe Motivationskraft und eignet sich zudem hervorragend zur Übung der prozessbezogenen Kompetenzen Erkenntnisgewinnung und Kommunikation einschließlich kritischer Wertung von Quellen.*

Der LehrplanPLUS nennt zwar lediglich die ökonomischen Kosten aufgrund der Folgen des anthropogen bedingten Treibhauseffekts, aber es ist notwendig, im Unterricht darüber hinaus zu gehen und auch weitere Inhalte wie die Mechanismen sowie die Datendiskussion (vgl. Lernbereich 1!) zu berücksichtigen. Zudem lassen sich hier weiter unten im LehrplanPLUS geforderte Lerninhalte unterbringen wie Erhaltungs- und Renaturierungsmaßnahmen sowie nachhaltige Nutzung. Im Folgenden gebe ich Informationen zu Teilaspekten, die ich dabei für wesentlich halte. Davon abgegrenzt werden Teilaspekte als fakultativ gekennzeichnet, die interessant sind, auf die aber auch verzichtet werden kann.

Das meiste davon ist auf dem recht umfangreichen Arbeitsblatt 10 berücksichtigt, das Sie je nach Lage in Ihrem Kurs übernehmen oder einkürzen können.

Arbeitsblatt 10 *Treibhauseffekt* [docx] [pdf]

Möglicher Einstieg
Meldung im Bayerischen Rundfunk am 10. Januar 2025: Der EU-Klimawandeldienst Copernicus in Brüssel teilt mit, dass die globale Durchschnittstemperatur im Jahr 2024 um 1,6 °C höher lag als der Durchschnitt der Jahre 1850 bis 1900. Damit wurde zum ersten Mal die 1,5-Grad-Marke überschritten, die im Pariser Klimaabkommen eigentlich als Obergrenze der Erderwärmung festgeschrieben ist. Aber weil die globale Durchschnittstemperatur über einen Zeitraum von 20 Jahren gemittelt wird, könnte dieses Ziel noch erreicht werden, wenn es gelingt, die Temperatur in den nächsten beiden Jahrzehnten wieder zu senken.

Erklärvideo ***Mai Think X****: „Der Matilda Effekt – geklaute Entdeckungen“ mit* Mai Thi Nguyen Kim (2:00-7:25)
https://www.zdf.de/video/shows/mai-think-x-die-show-102/maithink-x-matilda-100
Einsatz: humorvoller und dennoch lehrreicher Einstieg in die Thematik, ggf. auch als außerunterrichtliche Vorbereitung geeignet; auch in Ausschnitten einsetzbar; Unterdrückung von Frauen in der Wissenschaft sollte auch im Biologie-Unterricht angesprochen werden

Inhalt: einfacher Versuch von 1856, witzig vorgeführt, der belegt, dass sich Luft bei Bestrahlung mit Wärmestrahlen stärker erwärmt, wenn sie mehr Kohlenstoffdioxid enthält; Erklärung des Treibhauseffekts, der dafür sorgt, dass die globale Durchschnittstemperatur nicht bei –18 °C liegt, sondern bei +15 °C; Erhöhung des Kohlenstoffdioxid-Gehalts der Atmosphäre von vorindustriell 0,028 % auf jetzt (2025) 0,042 %. Der Versuch wird allgemein John Tyndall zugeschrieben, der ihn aber erst 1859 durchgeführt hat. Der Originalversuch stammt aber von Eunice Newton Foote, die allerdings vollständig ignoriert wurde, von der es nicht einmal ein Foto gibt.

Erklärvideo ***Treibhauseffekt einfach erklärt*** (4:05)
https://studyflix.de/erdkunde/treibhauseffekt-einfach-erklart-3810
Einsatz: sehr anschauliche Darstellung, durchgehend korrekt (nur der Begriff F-Gase ist eigentlich nicht üblich); sehr gut zum Selbststudium wie auch für den Unterricht geeignet
Inhalt: Begriff Treibhauseffekt (Vergleich Gewächshaus und Atmosphäre; Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid als Beispiele für Treibhausgase); ab 0:58 Mechanismus und Bedeutung des natürlichen Treibhauseffekts; ab 2:16 zusätzliche Erwärmung durch den anthropogenen Treibhauseffekt, kurze Übersicht über Ursachen und Auswirkungen (Klimawandel); ab 3:10 Treibhausgase: Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas, „F-Gase“ (FCKW und FKW) getrennt nach natürlichem und anthropogenem Treibhauseffekt.

Erklärvideo ***Natürlicher Treibhauseffekt*** (2:49)
https://studyflix.de/erdkunde/naturlicher-treibhauseffekt-3923
Einsatz: sehr anschauliche Darstellung, korrekt (bis auf einen kleinen Rechenfehler); bringt aber nicht mehr als die kürzere Darstellung im Film „Treibhauseffekt einfach erklärt“. Sehr gut v. a. zum Selbststudium geeignet.
Inhalt: Bedeutung des natürlichen Treibhauseffekts (lebensfreundliche Temperaturen); ab 0:50 Mechanismus (etwas ausführlicher als im Film „Treibhauseffekt einfach erklärt“, aber mit den gleichen Inhalten); ab 2:00 genauere Darstellung zum Temperatureffekt (kleiner Fehler: die Differenz aus +15 und –18 ist 33, nicht 32)

(Erklärvideo ***Anthropogener Treibhauseffekt*** (5:23)
https://studyflix.de/erdkunde/anthropogener-treibhauseffekt-4016
Einsatz: zum Selbststudium aufgrund der chemischen Fehler nicht geeignet; für den Unterricht in Ausschnitten bedingt geeignet, wenn die Fehler explizit angesprochen werden
Inhalt: sehr kurze Darstellung zum natürlichen und anthropogenen Treibhauseffekt in der Übersicht; ab 0:45 Nennung der klimawirksamen Gase Kohlenstoffdioxid, Methan, „Distickstoff“ (das ist ein schwerer sachlicher Fehler, denn Distickstoff ist der Name für elementaren Stickstoff, der keinerlei Treibhauseffekt

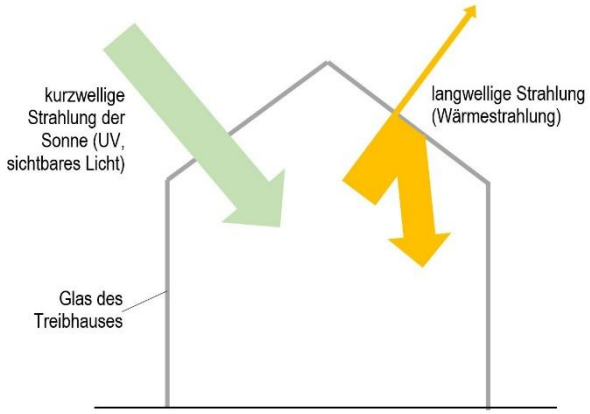
zeigt; gemeint ist vielmehr Lachgas = Distickstoffmonooxid), Ozon, Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW; aber ohne Nennung der FKW); ab 1:07 menschlicher Einfluss auf den Treibhauseffekt: Emission von Kohlenstoffdioxid und Ozon durch Verbrennung fossiler Energieträger, Emission von Methan und „Distickstoff" (gemeint ist Lachgas) durch Rinderhaltung, Reisanbau (nicht konkretisiert: Nassreisanbau) und Düngemittel, Emission der FCKW (ausschließlich anthropogen); ab 2:00 Wirkung der Treibhausgase: gemessen als Strahlungsantrieb (ein für den Schulunterricht sicher überflüssiger Begriff), abhängig von Konzentration (ungeschickt visualisiert), Treibhauspotential (auch hier wieder der falsche Begriff „Distickstoff"; auch „Dichloridfluormethan" ist falsch, es heißt Dichlormonofluormethan) und Verweildauer (hier steht im Text endlich „Distickstoffoxid", aber gesprochen wird wieder der Fehler); hierbei werden Zahlen angegeben, die ein wenig von den Zahlen anderer Quellen abweichen; ab 4:50 Klimawandel als Folge des anthropogenen Treibhauseffekts (Diagramme zur Entwicklung der globalen Temperatur bzw. atmosphärischen Kohlenstoffdioxid-Konzentration werden nicht gezeigt)

Stefan Rahmstorf: „Der globale CO_2-Anstieg: die Fakten und die Bauernfängertricks" (daraus stammen Informationen und Abbildungen in meinem Skript): LINK

Ein anschauliches Diagramm mit Kohlenstoffdioxid-Quellen und -Senken von 1850 bis 2000 finden Sie in Bioskop, Seite 285, Abbildung 2.
Eine anschauliche Gegenüberstellung von natürlichem und anthropogenem Treibhauseffekt mit entsprechenden Kohlenstoffdioxid-Quellen finden Sie in Biosphäre, Seite 239, Abb. 2.

a) Verhältnisse in einem realen Treibhaus

Die kurzwellige Strahlung der Sonne (UV, sichtbares Licht) tritt ungehindert durch das Glas eines Treibhaus ins Innere und erwärmt dort Luft und Boden. Durch physikalische und biochemische Prozesse entsteht daraus langwellige Strahlung (Infrarotstrahlung, Wärmestrahlung). Sie tritt nur zu einem sehr kleinen Teil durch das Glas wieder nach draußen, der bei weitem größte Anteil wird reflektiert und heizt Luft und Boden weiter auf.



Graphik *Gewächshaus*
schwarz-weiß [jpg]; farbig [jpg]

vgl. Aufgabe 1.1 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt" [docx] [pdf]

b) Treibhauseffekt in der Atmosphäre

Die Rolle der Glasscheiben im realen Gewächshaus wird in der Atmosphäre von den sogenannten Treibhausgasen übernommen. Sie lassen kurzwellige Strahlung der Sonne ungehindert durchtreten, reflektieren aber – je nach Art des Treibhausgases – einen mehr oder weniger großen Anteil der langwelligen Strahlung zurück zur Erdoberfläche.

In der politischen Diskussion ist heutzutage praktisch ausschließlich das Kohlenstoffdioxid. Bis zum Verbot der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) 1995 (in Deutschland) standen dagegen diese im Fokus der Klimadiskussion.

Molekularer Mechanismus (fakultativ): Die Moleküle der Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren die von der Erde Richtung All abgestrahlte Wärmestrahlung und geben sie in eine zufällige Richtung wieder ab (Streuung). Dadurch gelangt ein Teil der Wärmestrahlung zurück auf die Erdoberfläche und erwärmt diese zusätzlich.

c) Treibhausgase

Ich halte es für sinnvoll, den natürlichen vom anthropogenen Treibhauseffekt zu unterscheiden, weil der Mensch nur bei letzterem regulierend eingreifen kann.

Der natürliche Treibhauseffekt beruht auf Treibhausgasen, die aus natürlichen Quellen in die Atmosphäre gelangt sind. Er sorgt für die Bewohnbarkeit der Erde mit einer globalen Durchschnittstemperatur von etwa + 15 °C. Ohne diesen Effekt läge sie bei etwa – 18 °C. Bei dieser Temperatur wäre Wasser nicht flüssig und somit Leben, wie wir es kennen, nicht möglich (bzw. nur in großen Tiefen des Ozeans, wo es flüssiges Wasser und andere Energiequellen als die Sonne gibt).

vgl. Aufgabe 1.2 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

Dazu kommt seit Beginn der Industrialisierung um 1750 der anthropogene Treibhauseffekt, denn seitdem wurden fossile Brennstoffe (zunächst Kohle) in immer größerem Umfang eingesetzt.

Fakultativ bzw. Hintergrundinformation, kein Lerninhalt:
Die Treibhausgase unterscheiden sich erheblich in ihrer Konzentration, ihrer Verweildauer in der Atmosphäre sowie ihrem Treibhaus-Potential. Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Fakten zusammen.
[vgl. Wikipedia-Eintrag Treibhausgase; die Angaben bei studyflix weichen ein wenig davon ab]

Treibhausgas	Konzentration in ppm	durchschnittl. Verweildauer	Treibhaus-Potential*	Anteil am Treibhauseffekt
Kohlenstoffdioxid CO_2	derzeit 410	Jahrzehnte	1	19-24 %
Methan CH_4	unter 2	9 Jahre	25	20 %
Distickstoffmonooxid N_2O		114 Jahre	298	6-9 %
Fluorkohlenwasserstoffe FKW **		***	14.800	10 %

*) Kohlenstoffdioxid wird als Standard verwendet und erhält den Wert 1 (CO_2-Wirkung in 100 Jahren); die Werte sind bezogen auf die Masse.
**) Fluorkohlenwasserstoffe ersetzen die in Deutschland seit 1995 verbotenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW
***) sehr unterschiedlich: von 1,5 Jahren bei 1,1-Difluorethan bis 50.000 Jahren bei Tetrafluormethan

Weitere Gase mit Treibhauswirkung sind Wasserdampf (39-72 % Anteil am Treibhauseffekt) und Ozon O_3 (stratosphärisches Ozon wirkt kühlend, troposphärisches Ozon dagegen erwärmend auf die Erdoberfläche ein). Auch Wolken (aus Wassertröpfchen bzw. Eiskristallen) können regional für bis zu 25 % der Erderwärmung verantwortlich sein, weil sie Strahlung (auch Wärmestrahlung) effektiv reflektieren (allerdings reflektieren sie auch Sonnenstrahlung, so dass sie unter anderen Umständen auch kühlend wirken können).

Die Zusammenhänge sind hochkomplex und auch noch nicht vollständig erforscht.

d) Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre

Der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre wird in Parts per Million (ppm) angegeben, also in Millionstel Anteilen am Gasvolumen.

1958 wurde auf dem Berg Mauna Loa auf Hawaii in knapp 3400 Metern Höhe ein Observatorium in Betrieb genommen, das seither kontinuierlich den Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre misst.

Aus der Zeit davor gibt es keine direkt gemessenen Werte. Man behilft sich mit Eisbohrkernen aus der Antarktis. Darin sind Luftbläschen eingeschlossen, deren Kohlenstoffdioxidgehalt direkt gemessen werden kann. Das Alter der Schicht, aus der die Bläschen stammen, kann

indirekt ermittelt werden, weil sich die Isotopen-Zusammensetzung des Wassers (und damit des Eises) im Laufe der Zeit kontinuierlich verändert.

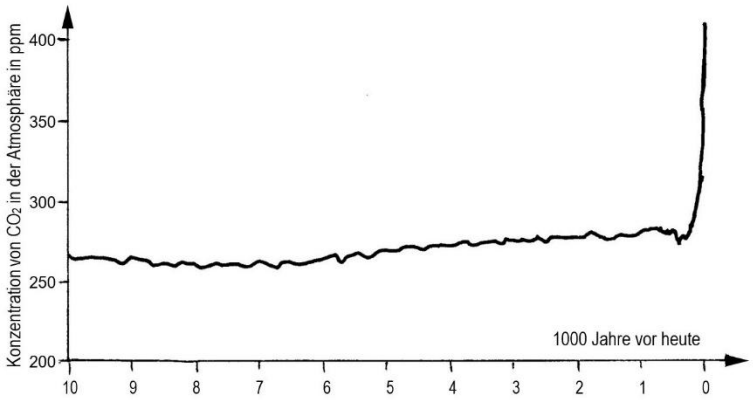
Die Ergebnisse aus den Eisbohrkernen und die Messdaten von Mauna Loa stimmen genau überein (1958-1978), so dass man davon ausgehen kann, dass auch die übrigen Daten aus der Antarktis relevant sind. (Das ist auf der Graphik dargestellt, auf der auch die Zyklen der Sonnenflecken zu sehen sind; s. u.)

Die Graphik unten zeigt die Entwicklung des Kohlenstoffdioxidgehalts seit dem Ende der letzten Eiszeit (Würmeiszeit) vor etwa 10.000 Jahren. Er lag lange Zeit bei etwa 270 ppm und stieg dann leicht an auf 280 ppm, bevor der rasante Anstieg in jüngster Zeit einsetzte. Die Daten aus den Eisbohrkernen zeigen, dass der Kohlenstoffdioxidgehalt – mit Ausnahme der letzten 100 Jahre – nie über 300 ppm lag.

Die Kursteilnehmer beschreiben die Entwicklung des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre, vergleichen geglättete und nicht geglättete Darstellung und erklären die Herkunft der Daten.

vgl. Aufgabe 2 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

Graphik *CO_2-Konzentration in den letzten 10.000 Jahren* [jpg]



Atmosphärische Kohlenstoffdioxid-Konzentration in den letzten 10.000 Jahren, aus Eisbohrkernen in der Antarktis vor 1958, ab 1958 nach Daten von Mauna Loa

Hinweis: CNN vermeldet am 1.7.2025, dass der amerikanische Präsident Trump viele Klimastationen schließen lassen will, darunter die auf Mauna Loa.

Weitere Vertiefung zur Qualität und Aussagekraft der Messwerte (fakultativ, eher eA-Kurs):

- Die Lufteinschlüsse im Eis sind extrem gut eingekapselt, aber dennoch könnten die darin enthaltenen Gase in extrem geringem Umfang aus der Blase ins umgebende Eis diffundieren. Die Kursteilnehmer könnten die Folgen einer solchen Diffusion diskutieren, zunächst unter der Annahme, dass das Ausmaß der Diffusion bei allen Gasen (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid) gleich sei, im Anschluss könnten sie ggf. die Molekülmasse einbeziehen und davon ausgehen, dass die Diffusionsrate mit steigender Masse sinkt. Im ersten Fall verringert sich zwar die Gasmenge pro Blase, nicht aber die prozentuale Zusammensetzung. Im zweiten Fall würde sich Kohlenstoffdioxid anreichern und damit suggerieren, dass sein Gehalt früher höher war als in Wirklichkeit (es ergäben sich also keine zu niedrigen Werte).
- Mauna Loa ist ein Vulkan und Vulkane stoßen Gase aus, darunter Kohlenstoffdioxid. Die dort gemessenen Werte der Kohlenstoffdioxid-Konzentration könnten also zu hoch sein. Die Kursteilnehmer könnten diskutieren, wie solche Messfehler erkannt und eliminiert werden könnten. Beispielsweise müssten Vergleichsdaten an anderen Standorten erhoben werden (fern von Vulkanen und anderen Kohlenstoffdioxid-Quellen, z. B. an der Messstation am Hohenpeißenberg bzw. durch Satelliten; die Kursteilnehmer könn-

ten dies recherchieren). Messwerte zu einzelnen Ausstoß-Ereignissen sind deutlich erkennbar (als Zacken nach oben) und werden als Ausreißer ausgesondert.

- Klimaskeptiker berichten von wissenschaftlichen Messwerten aus dem 19. Jahrhundert, die angeblich belegen, dass damals die Kohlenstoffdixoid-Konzentration teilweise höher gelegen hätte als heute. Die Kursteilnehmer könnten überlegen, welche Fehler hierbei aufgetreten sein könnten. Der Schweizer Naturforscher Nicolas Theodore de Saussure veröffentlichte Ende der 1820er-Jahre Werte zwischen 315 und 574 ppm (zitiert in der 2. Auflage von Meyers Konversations-Lexikons von 1853). Er schüttelte eine definierte Luftmenge mit einer Bariumhydroxid-Lösung aus, isolierte das durch Reaktion mit Kohlenstoffdioxid entstandene Bariumcarbonat und bestimmte über dessen Gewichtsmessung den Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Luft. Er traf mit dieser Methode sehr gut die Größenordnung, aber für derart genaue Zahlenwerte ist sie nicht geeignet. Die vermutlich genauesten Messungen des 19. Jahrhunderts stammen aus den 1880er-Jahren in Frankreich mit Werten zwischen 288 und 422 ppm (zitiert in der 4. Auflage von Meyers Lexikon von 1885). Messungen um die Jahrhundertwende ergaben schließlich einen Durchschnittswert von etwa 300 ppm (zitiert in der 6. Auflage von 1903). *Die Werte aus dem 19. Jahrhundert werden in einemFaktencheck-Blog der Austria Presse Agentur vom 17.9.2022 genannt:*
https://apa.at/faktencheck/co2-gehalt-der-luft-im-19-jahrhundert-viel-geringer/
Darin sind auch Angaben zu den Messmethoden enthalten, auch den modernen, sowie die Links zu sämtlichen Quellen. Die Kursteilnehmer können die Glaubwürdigkeit dieser Quelle anhand der üblichen Kriterien beurteilen (z. B. Autoren, Aufmachung, Quellenangaben).

e) Globale Durchschnittstemperatur

Die Lufttemperatur wird seit dem 15.12.1654 kontinuierlich gemessen (zunächst nur Florenz). Seither liegen direkte Messwerte vor. Angaben zur globalen Temperatur aus Zeiten davor können nur indirekt erschlossen werden z. B. über Interpretation von Daten aus Eisbohrkernen (z. B. von Grönland).

Weil die Lufttemperatur regelhaft mit dem Tages- wie Jahresablauf, aber auch unregelmäßig von Tag zu Tag stark schwankt, muss für die langfristige Betrachtung ein Mittelwert berechnet werden, bei dem kurzzeitige Schwankungen wie extreme Wetterereignisse herausgemittelt werden. Seit 1880 wird die globale Durchschnittstemperatur nach einem allgemein anerkannten Rechenverfahren anhand von Messungen der weltweit verteilten Wetterstationen ermittelt.

In Graphiken zur Temperaturentwicklung wird meist die Abweichung von einer Referenztemperatur (in der Graphik: „Abweichung 0,0 °C“) dargestellt. Diese Referenztemperatur ist der Durchschnittswert über eine längere Periode, die aber von Darstellung zu Darstellung unterschiedlich festgelegt sein kann. Das ist für die Wirkung des Diagramms entscheidend: Wird als Referenztemperatur der Durchschnittswert vom Ende der Würmeiszeit bis zum Beginn der Industrialisierung (etwa 1750) gewählt, dann ist im Jahr 2020 die Abweichung vom Referenzwert erheblich größer, als wenn der Durchschnittswert aus der Periode zwischen 1901 und 2000 gewählt wird.

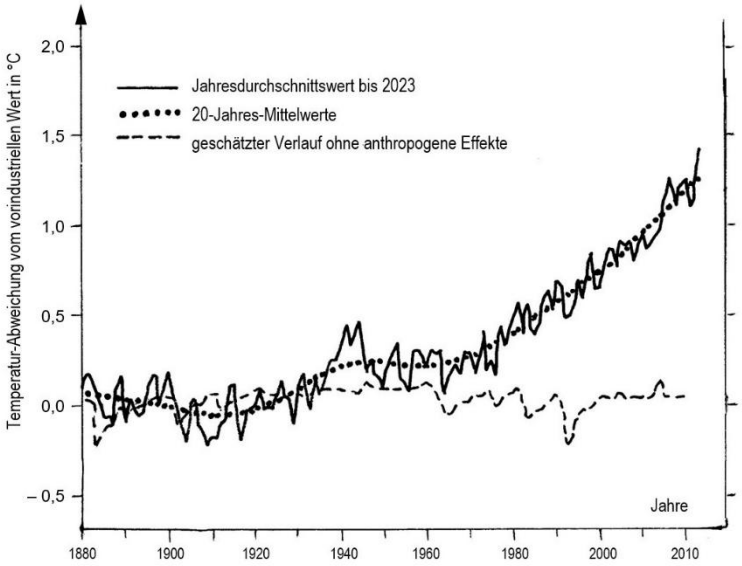
Referenzwert: vgl. Aufgabe 5.3 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

Die Kursteilnehmer beschreiben die Entwicklung der globalen Temperatur, vergleichen Diagramme mit unterschiedlichen Referenztemperaturen und beschreiben den Einfluss des anthropogen verursachten Treibhauseffekt auf die globale Durchschnittstemperatur.

Globale Durchschnittstemperatur:
vgl. Aufgabe 3 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

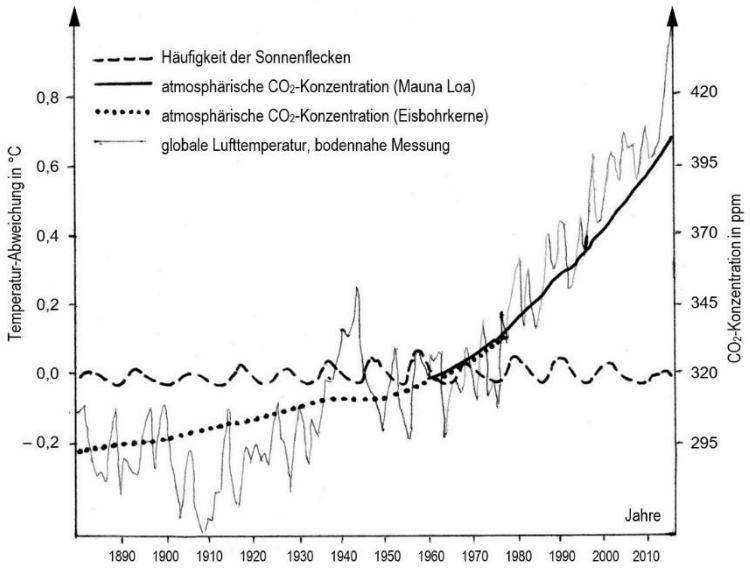
Anthropogen bedingter Treibhauseffekt:
vgl. Aufgabe 6 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

Globale Durchschnittstemperatur in Jahresmittelwerten und 20-Jahren-Mittelwerten (z. B. steht bei 1940 der Durchschnittswert der Jahre 1921 bis 1940) [Diskussion unter Teilabschnitt h)] sowie der geschätzte Verlauf ohne Einfluss menschlicher Aktivitäten



Graphik *Globale Temperatur 1880 bis 2010* [jpg]

Globale Durchschnittstemperatur in Jahresmittelwerten (Referenz-temperatur = Durchschnitt zwischen 1901 und 2000), atmosphärischer Kohlenstoffdioxidgehalt und Häufigkeit von Sonnenflecken; die Werte aus den Eisbohrkernen stimmen mit denen von Mauna Loa genau überein, sie wurden zur besseren Sichtbarkeit etwas unter die durchgezogene Linie gezeichnet



Graphik *Globale Temperatur, CO_2-Konzentration, Sonnenflecken* [jpg]

f) Korrelation und kausale Beziehung

Das steht zwar nicht explizit im LehrplanPLUS, muss aber im Rahmen des Lernbereichs 1.2 (Erkenntnisgewinnung) einmal angesprochen werden.

Eine Beziehung zwischen zwei oder mehreren Kurvenverläufen nennt man eine Korrelation. Das muss nicht unbedingt auch eine kausale Beziehung (Ursache-Wirkungs-Beziehung) darstellen, denn dass in Deutschland in den letzten 50 Jahren sowohl die Größe der Storchenpopulation als auch die Geburtenrate niedriger geworden ist, beweist noch lange nicht, dass die Säuglinge von Störchen gebracht werden.

Aus der letzten Abbildung lässt sich ersehen, dass der Verlauf der Sonnenflecken nicht mit der Entwicklung der globalen Temperatur korreliert, während die Verläufe von globaler Temperatur und Kohlenstoffdioxidgehalt gut korrelieren.

Von der bloßen Korrelation zu unterscheiden ist eine kausale Beziehung, die bei der oben genannten Korrelation experimentell überprüft und bestätigt wurde: Je höher der Anteil an

Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre ist, desto höher ist der Treibhauseffekt, desto wärmer ist die Atmosphäre.

Die Kursteilnehmer beschreiben die Korrelation und stellen die kausale Beziehung dar.

Korrelation und kausale Beziehung:
vgl. Aufgabe 4 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

g) Ökonomische Kosten durch den Klimawandel

Es ist im Rahmen des Kursunterrichts nicht möglich, diesen Aspekt einigermaßen umfassend zu behandeln. Vielmehr sollten die Kursteilnehmer einen gegliederten Überblick erhalten. Zunächst könnten sie im Brainstorming ihr Vorwissen sammeln (ich habe diesen Aspekt auf dem Arbeitsblatt nicht berücksichtigt).

Begriffsklärung:

- Wetter beschreibt regionale Ereignisse zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. einer kurzen Phase, z. B. die Niederschlagssumme und die Durchschnittstemperatur an einem bestimmten Tag in Oberbayern oder ein Gewitter in Würzburg.
- Klima beschreibt Durchschnittswerte über einen längeren Zeitraum (Jahrzehnte), so dass sich kurzfristige Schwankungen herausmitteln.

Der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur bewirkt einen Klimawandel. Einzelne Wetterereignisse wie ein Starkregen oder ein besonders heißer Sommertag können wissenschaftlich nicht eindeutig dem Klimawandel zugeschrieben werden. Aber es kann statistisch nachgewiesen werden, dass durch die globale Erwärmung extreme Wetterereignisse mit erhöhter Wahrscheinlichkeit und oft auch mit erhöhter Heftigkeit auftreten.

Direkte Folgen des Klimawandels *

- steigende Maximaltemperaturen
- steigende Minimaltemperaturen
- steigender Meeresspiegel
- höhere Meerestemperaturen
- zunehmende Starkniederschläge (Starkregen und Hagel)
- Zunahme des Anteils heftiger tropischer Wirbelstürme
- Zunahme von Trockenheit und Dürre
- Rückgang des arktischen Meereises und der Schneebedeckung
- Gletscherschwund (Masse nimmt ab) und Gletscherrückgang (Länge nimmt ab)
- tauender Permafrost

Indirekte Folgen des Klimawandels *

- Zunahme der Hunger- und Wasserkrisen insbesondere in Entwicklungsländern
- Existenzbedrohung durch Überschwemmungen und Waldbrände
- Gesundheitsrisiken durch Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzeextremen
- wirtschaftliche Folgen für die Beseitigung der Klimafolgeschäden
- weitere Verbreitung von Schädlingen und Krankheitserregern
- Verlust an Biodiversität durch begrenzte Anpassungsfähigkeit und -geschwindigkeit von Flora und Fauna
- Ozeanversauerung durch erhöhte Konzentrationen an Bicarbonat = Hydrogencarbonat (HCO_3^-) im Wasser als Folge erhöhter CO_2-Konzentrationen (kein Lerninhalt: Kohlenstoffdioxid löst sich in Wasser, wandelt sich in Kohlensäure um und wird durch einfache Deprotonierung zu Bicarbonat)
- Anpassungsnotwendigkeit in jeglichen Bereichen (z. B. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Energiewirtschaft, Infrastruktur, Tourismus, etc.)

* aus myclimate Deutschland (aufgerufen am 15.12.2024):
https://www.myclimate.org/de-de/informieren/faq/faq-detail/was-sind-die-folgen-des-klimawandels/

Bestimmte aride und semiaride Gebiete werden intensivere Dürren erleben und dadurch weniger landwirtschaftlichen Ertrag erwirtschaften bzw. für eine Bewirtschaftung wegfallen, dafür werden ehemalige Permafrostböden auftauen und damit für die Landwirtschaft zugänglich werden. Auftauende Permafrostböden entlassen allerdings Treibhausgase und verstärken den Treibhauseffekt (s. u.).

Die indirekten Folgen des Klimawandels sind zusammengefasst in Buchner, Seite 222, M1.

Die Herausforderungen durch die Klimaerwärmung für die Forstwirtschaft in Deutschland werden anhand der wirtschaftlich wichtigsten Baumarten in Buchner, Seite 211, M2, dargestellt.

Ggf. kann der Begriff „Kipp-Punkt“ angesprochen werden: Darunter versteht man den Schwellenwert einer Größe (z. B. Temperatur), ab dem aufgrund positiver Rückkopplungs-Effekte („Aufschaukeln“) die Folgen nicht mehr rückgängig gemacht werden können, auch wenn der Wert wieder gesenkt wird. Kipp-Punkte werden durch Modell-Berechnungen ermittelt und können in der Realität an etwas verschobener Stelle liegen, weil ein Modell nicht alle Parameter berücksichtigen kann und weil nicht alle nötigen Messwerte vorliegen.

Fallbeispiel Antarktis (fakultativ):
Aufgrund der Klimaerwärmung schmilzt die Eisdecke auf dem antarktischen Kontinent. Im Netz wird dagegen die Behauptung verbreitet, die Menge an Eis nehme seit 2021 wieder zu, ein Anstieg des Meeresspiegels sei also nicht zu befürchten. Diese Aussage ist falsch, denn die kurzzeitige Zunahme des Eises erfolgte innerhalb der normalen Schwankungsbreite aufgrund erhöhter Niederschläge. Der Denkfehler liegt darin, dass aus kurzzeitigen Ereignissen keine Rückschlüsse auf langjährige Entwicklungen getroffen werden können. *Im BR-Faktenfuchs finden Sie hierzu eine für Kursteilnehmer klar verständliche Darstellung unter folgendem Link:*
https://www.br.de/nachrichten/deutschland-welt/mehr-antarktis-eis-warum-das-kein-grund-zur-entwarnung-ist-ein-faktenfuchs,UoMz1wN

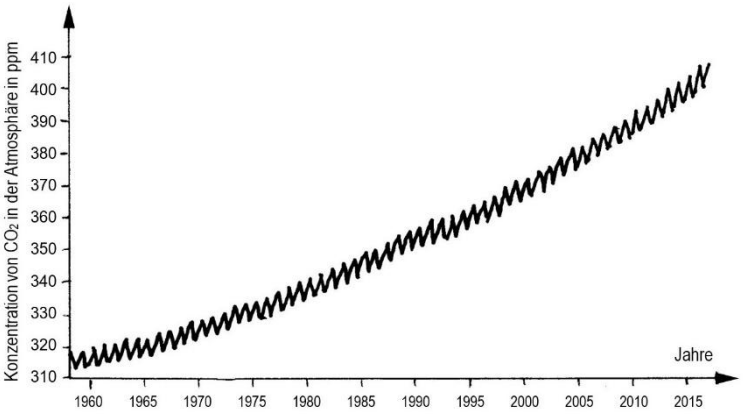
h) Beurteilung von Darstellungsweisen (Lernbereich 1.3: Kommunikation)

Die Kursteilnehmer sollen ein Bewusstsein dafür entwickeln, dass die Datenauswahl und die Formatierung einer Graphik die Wahrnehmung entscheidend beeinflussen können. Ich habe für das Arbeitsblatt zwei Beispiele dafür ausgewählt, die im Folgenden dargestellt sind.

Eine für Schüler gut geeignete seriöse Quelle für Klimadaten und eine kritische Auseinandersetzung mit Falschmeldungen in der Presse (auch als Lektüre für die Lehrkraft mit Lesedauer 12 Minuten) bildet Stefan Ramstorfs Artikel „Der globale CO_2-Anstieg: die Fakten und die Bauernfängertricks“ auf der Webseite Spektrum.de SciLogs, der als Grundlage für das Arbeitsblatt dient:
https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/der-globale-co2-anstieg-die-fakten-und-die-bauernfaengertricks/

Darin wird ein Artikel von Daniel Wetzel in der „Zeit“ auszugsweise zitiert, in dem die Auswirkungen des Kohlenstoffdioxid-Anstiegs heruntergespielt werden sollen. Stephan Ramstorf erklärt genau, warum dessen angebliche Belege nicht stichhaltig sind. Ich habe diese Aussagen nicht in das Arbeitsblatt integriert, aber sie sind sehr gut für Schülerreferate geeignet.

In dieser Abbildung sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Kohlenstoffdioxid-Konzentration der unteren Atmosphäre nach Messdaten von Mauna Loa seit 1958 dargestellt.



Atmosphärische Kohlenstoffdioxid-Konzentration, gemessen auf dem Mauna-Loa-Observatorium (1958-2017)

Graphik *CO_2-Konzentration seit 1958, nicht geglättet* [jpg]

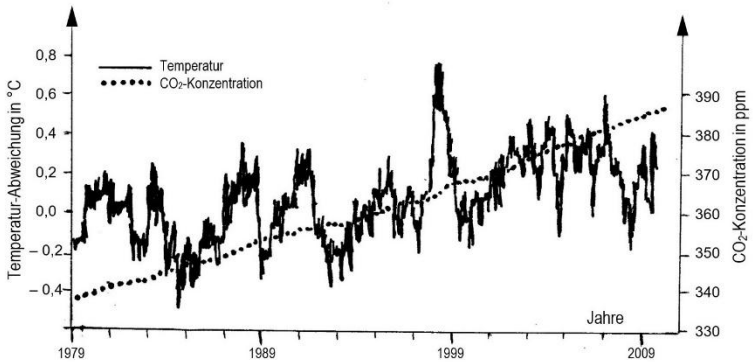
In den folgenden Abbildungen ist die globale Durchschnittstemperatur in unterschiedlicher Weise angegeben. Beide Darstellungsweisen sind korrekt, veranschaulichen aber unterschiedliche Aspekte:

Die Jahresdurchschnittswerte zeigen die Schwankungen von Jahr zu Jahr deutlich. Die 20-Jahres-Mittelwerte (z. B. steht bei 1940 der Mittelwert aus den Jahren 1921 bis 1940) zeigen den Anstieg deutlicher, weil der Blick nicht durch die Schwankungen abgelenkt wird.

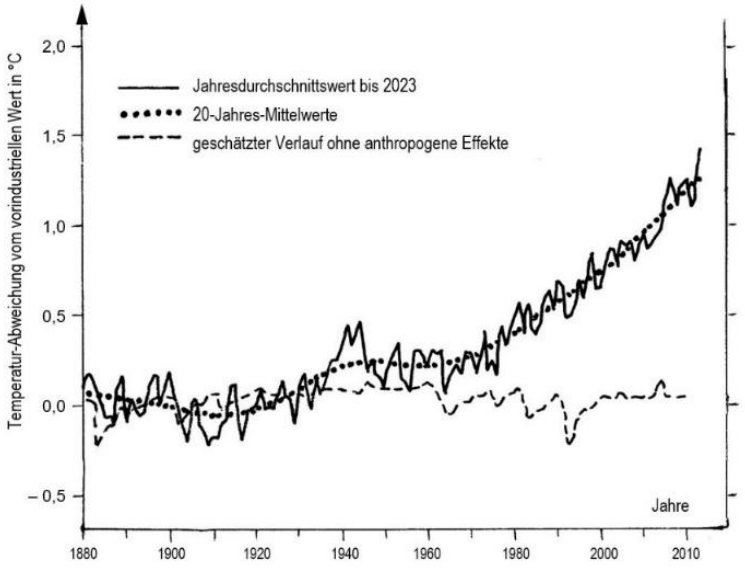
vgl. Aufgabe 5.2 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

Temperatur und Kohlenstoffdioxid-Konzentration nach einer oft geteilten Darstellung aus dem Blog von Anthony Watts

Graphik *Temperatur und Kohlenstoffdioxid-Konzentration nach Watts* [jpg]



Entwicklung von Temperatur und Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Atmosphäre nach einer Abbildung von Anthony Watts



Graphik *Globale Temperatur 1880 bis 2010* [jpg] (identische Abbildung wie in Teilabschnitt e)

Der US-Blogger und Klimaskeptiker Anthony Watts zeigt auf seiner Webseite die obere Graphik, die besonders verbreitet ist und suggerieren soll, dass der Anstieg der Kohlenstoffdioxid-Konzentration in der Atmosphäre keinen oder kaum einen Einfluss auf die globale Temperatur hat. Um dies zu erreichen, wählt Watts nicht die bodennahen Lufttemperaturen, die für die Ökosysteme entscheidend sind, sondern Temperaturen aus den hohen Schichten der Troposphäre (das ist die Luftschicht, in der sich fast alle Wetterphänomene abspielen). Dort zeigen die Temperaturschwankungen eine viel höhere Amplitude als im bodennahen Bereich und der langfristige Temperaturanstieg ist in dieser Höhe kaum zu erkennen. Zudem verwendet Watts die Monatsdurchschnittswerte, so dass die Schwankungen betont werden und einen eventuellen Trend verschleiern. Stefan Ramstorf setzt sich in seinem Artikel „Die populärste Trickgraphik der Klimaskeptiker“ auf Spektrum.de SciLogs detailliert damit auseinander:
https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/die-populaerste-trickgrafik-der-klimaskeptiker-vahrenholt/

vgl. Aufgaben 5.4 und 5.5 auf dem Arbeitsblatt 10 „Treibhauseffekt“ [docx] [pdf]

i) Gegenmaßnahmen

Dieser Aspekt wird auf meinem Arbeitsblatt nicht berücksichtigt. Die Betrachtung der Gegenmaßnahmen deckt mehrere Formulierungen im Lernbereich 4.2 ab: Erhaltungs- und Renaturierungs-Maßnahmen sowie nachhaltige Nutzung. Alternativ können die Maßnahmen auch als eigener Unterpunkt (2.2.3) abgehandelt werden.

Es ist in der Wissenschaft allgemein anerkannt, dass der Anstieg der Kohlenstoffdioxid-Konzentration anthropogen bedingt ist und in der Atmosphäre die Klimaerwärmung verursacht (auch wenn es interessierte Kreise gibt, z. B. in der Erdöl-Industrie, die dies zu leugnen versuchen und sich mit sehr viel Geld auch Gehör zu verschaffen wissen). Gegenmaßnahmen zielen deshalb darauf ab, den Gehalt an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre zu verringern bzw. dessen Anstieg möglichst klein zu halten. Die Umstellungen in der Wirtschaft in diesem Sinne nennt man Dekarbonisierung (Entkarbonisierung).

Nachhaltige Nutzung von Ressourcen:

- Fossile Energieträger sollen möglichst schnell durch regenerierbare Energieträger wie elektrischen Strom aus Solarkollektoren bzw. Windkraftwerken ersetzt werden. Er kann auch dafür verwendet werden, um elementaren Wasserstoff als speicher- und transportierbaren Energieträger zu gewinnen. Auch die Gewinnung von Energieträgern wie z. B. Methan aus Biomasse sind dafür eine geeignete Maßnahme.
- Holz sollte zunächst möglichst als Baustoff verwendet werden, weil es Kohlenstoff speichert. Erst nach einer möglichst langen Nutzungszeit sollte es als Brennstoff eingesetzt werden (Kaskaden-Nutzung).

Erhaltungsmaßnahmen:

- Wälder und Moore sollten so weit wie möglich erhalten werden, weil sie Kohlenstoffdioxid binden. Allerdings setzen sie bei der Zersetzung der Biomasse die gleiche Menge an Kohlenstoffdioxid auch wieder frei. Als Kohlenstoffspeicher wirken deshalb neben der Biomasse weitere organische Anteile im Boden, soweit sie nicht oder nur langsam zersetzt werden.

Renaturierungsmaßnahmen:

- Bereits gerodete Wälder und trocken gelegte Moore sollten so weit wie möglich wiederhergestellt (renaturiert) werden (vgl. Abschnitt 2.4). Intakte Moore haben mit Abstand die höchste Rate bei der Bindung von Kohlenstoffdioxid.

j) Quellen der Treibhausgase (fakultativ bzw. zur Information der Lehrkraft)

Hauptquellen anthropogener Treibhausgase:

- Landwirtschaft
- Verbrennung fossiler Energieträger

Treibhausgas	natürliche Quellen	anthropogene Quellen
Kohlenstoffdioxid CO_2	Stoffwechselprodukt bei Gärung und Zellatmung	Verbrennung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl, Erdgas oder Torf in der Industrie, im Verkehr, beim Heizen; Abfallprodukt bei der Herstellung von Zement aus Kalkstein
Methan CH_4	Ausgasen aus Binnengewässern sowie aus auftauenden Permafrostböden (dort gespeichert in Form von festem Methanhydrat)	Industrie (50 %): Lecks bei Förderung, Transport usw. von Erdgas; Fracking; Land- und Forstwirtschaft (50 %): Ausgasen aus Klärwerken und Mülldeponien, von Mikroorganismen freigesetztes Gärungsprodukt in Wiederkäuern, v. a. Rindern*, Ausgasen aus Nassreis-Feldern
Distickstoffmonooxid N_2O	wie anthropogene Quellen, aber in geringerem Ausmaß	Ausgasung bei der Viehhaltung bzw. Bewirtschaftung von Äckern (bei Düngung)
FWK und FCKW (letztere seit 1995 in Deutschland verboten)	keine	Kühlmittel in Kühl- und Gefrieranlagen, Brandschutzmittel beim Löschen, Treibmittel z. B. in Sprays

*) Buchner, Seite 237, M2 enthält einen grünen Textkasten, in dem der Zusammenhang von Fleischkonsum und Emission von Treibhausgasen erläutert wird (linke Spalte, dritter von oben).

Buchner, Seite 215, Abbildung B3 zeigt den jährlichen Ausstoß von Treibhausgasen in Tonnen CO_2-Äquivalente pro Hektar in vier unterschiedlichen Biotopen.

k) Senken für Treibhausgase (fakultativ bzw. zur Information der Lehrkraft)

Kohlenstoffdioxid-Senken sind Thema im eA-Kurs im Lernbereich 4.3 (Teilabschnitt 3.1.1). Man kann diesen Aspekt im eA-Kurs an dieser Stelle also weglassen bzw. sich auf die anderen Treibhausgase beschränken.

Bereiche der Kohlenstoffdioxid-Senken:

- an Land
- in der Atmosphäre
- im Meer

Treibhausgas	Senken
Kohlenstoff-dioxid	• Photosynthese (aber nach mehr oder weniger Zeit durch Abbau der Biomasse erneute Freisetzung von Kohlenstoffdioxid; Holz am Bau* dient Jahrzehnte bis Jahrhunderte als Kohlenstoff-Speicher; in Mooren wird der Kohlenstoff viele Jahrtausende lang in Form von Torf gespeichert; fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas sind vor vielen Millionen Jahren aus Biomasse entstanden) • Bildung von Calcium- bzw. Magnesiumcarbonat (Kalkstein u. a.) im Meer, solange die Vorräte an Calcium- und Magnesium-Ionen reichen • gelöstes Kohlenstoffdioxid im Meerwasser (wird teilweise in Kohlensäure umgewandelt und führt zur Versauerung) • Ablagerung von Biomasse auf dem Meeresboden**

	• künstlich angelegte unterirdische Speicher von Kohlenstoffdioxid (Gefahr des Ausgasens)*** • Einsatz von Basaltmehl in der Landwirtschaft****
Methan	in sehr geringem Umfang Bakterien in der Nähe von Gewässern, in denen Methan freigesetzt wird, das von ihnen als Energiequelle genutzt wird
Distickstoff-monooxid	Abbau mit Hilfe von Sonnenlicht in der Stratosphäre (Verweildauer: 114 Jahre)
FWK und FCKW	Abbau mit Hilfe von Sonnenlicht in der Atmosphäre (Verweildauer: sehr unterschiedlich, abhängig vom Stoff)

*) Propagiert wird die sogenannte Kaskaden-Nutzung von Holz: beispielsweise zunächst Verwendung als Bau- oder Möbelholz, dann zerkleinert und zu Spanplatten verarbeitet, dann ggf. zermahlen und bei der Papierherstellung eingesetzt und erst ganz zum Schluss thermisch verwertet (= zur Wärmegewinnung verbrannt).

**) Ein Teil der organischen Substanz, die auf den Meeresboden absinkt, wird von Sediment bedeckt und bleibt dort Jahrzehnte bis Jahrhunderte lang ungenutzt liegen. Wenn Fischtrawler ihre Schleppnetze über den Meeresboden ziehen, wird das Sediment aufgewirbelt, so dass die Partikel aus organischer Substanz von Organismen aufgenommen werden und als Stoffwechselprodukt Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird. Man hat in Meeresbereichen mit und ohne Schleppnetzfischerei die Meeresböden untersucht und festgestellt, dass der Kohlenstoffgehalt in letzteren erheblich kleiner ist. Berechnungen ergeben, dass allein in der Nordsee durch intensive Fischerei jährlich eine Million Tonnen Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre gelangt, weltweit sind es etwa 30 Millionen Tonnen pro Jahr.
[aus Nature Geoscience, 2024; zitiert in Spektrum der Wissenschaft 3.2025, Seite 10-11]
Dabei kommt es aber zu unerwünschten Nebenwirkungen, wenn die abgestorbene Biomasse der Mikroorganismen oxidativ zersetzt wird: Der Sauerstoffgehalt im Ozean verringert sich offenbar erheblich. Der gleiche unerwünschte Effekt wird beobachtet, wenn die Bildung von Biomasse durch künstliche Düngung im Meer angeregt wird, aber auch bei der Makroalgenzucht mit anschließendem Versenken der Algenbiomasse sowie beim künstlichen Auftrieb von nährstoffreichem Tiefenwasser des Meeres. Deshalb konstatiert Andreas Oschlies vom GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung in Kiel: „Was gut für das Klima ist, ist nicht automatisch gut für den Ozean."
[nach Oschließ et al.: Enivornmental Research Letters 10.1088/1748-9326/ade0d4, 2025. Bericht von Katharina Menne: Schlechte Noten für manche Maßnahmen in Spektrum der Wissenschaft 9.25, Seite 28-29]

***) Kohlenstoffdioxid kann in Industrieanlagen direkt aus der Abluft abgetrennt werden. In sogenannten DAC-Anlagen (*direct air capture*) wird Luft mit Unterstützung von Ventilatoren z. B. über Paletten mit fein gemahlenem Calciumoxid geleitet, das mit dem Kohlenstoffdioxid zu Calciumkarbonat reagiert, das anschließend stark erhitzt wird, wobei das dabei freigesetzte Kohlenstoffdioxid aufgefangen, komprimiert und in tief unter der Erdoberfläche befindliche Hohlräume verpresst wird. Das geschieht z. B. auf der gigantisch großen Gray Ranch in Texas, einem Ölbohrgebiet. Dort verdient man mit der neuen Technologie gleich dreifach: Zum einen erhält die Firma 180 Dollar Steuergutschrift pro Tonne Kohlenstoffdioxid, die durch DAC aus der Luft entfernt wird (Stand 2025), zweitens kann sie die dadurch erworbenen Kohlenstoffdioxid-Zertifikate verkaufen (z. B. an die benachbarte Ölförderfirma) und drittens wird das Gas zum Teil in das poröse Gestein verpresst, in dem noch Erdöl festhängt, so dass die Ölförderung dort weiter gesteigert wird, die für weitere Freisetzung von Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre sorgen wird.
[Alec Luhn: Die große Entziehungskur. In Spektrum der Wissenschaft 3.2025, Seite 46-55]

****) Basalt ist ein vulkanisches Ergussgestein, das überall auf der Erde in sehr großen Mengen vorkommt. Wenn Basalt verwittert, reagiert er mit Wasser und Kohlenstoffdioxid, das dabei in Hydrogencarbonat (HCO_3^-) umgewandelt wird. Außerdem werden dabei Mikronährstoffe wie Calcium- und Magnesion-Ionen sowie Kieselsäure freigesetzt, die als Dünger wirken. Diese Verwitterung wird durch das Mahlen von Basaltgestein (Oberflächenvergrößerung) und das Ausbringen des Basaltmehls auf die Felder stark beschleunigt (beschleunigte Gesteinsverwitterung = enhanced rock weathering = ERW). Ein Feldversuch mit Basaltmehl im US-amerikanischen Illinois ergab 2024 eine Ertragssteigerung bei Hafer um 9-20 %, eine Verringerung des Bodensäuregehalts und über einen Zeitraum von 4 Jahren eine zusätzliche Bindung von Kohlenstoffdioxid von 10 t/ha im Vergleich zu unbehandelten Feldern. Ein

Feldversuch auf Reisfeldern in Indien ergab eine Ertragssteigerung von durchschnittlich 15-20 % (auf stark versäuerten, mineralstoffarmem Boden sogar bis zu 70 %). Das Hydrogencarbonat gelangt zunächst ins Grundwasser und letztendlich ins Meer, wo es in Form unlöslicher Salze auf dem Meeresboden gespeichert wird (wenn das Meerwasser nicht zu sauer ist).
[Douglas Fox: Feldversuch fürs Klima. In Spektrum der Wissenschaft 8.25, Seite 38-45]

Alle diese Detail-Angaben dienen allenfalls der Konkretisierung und Veranschaulichung und stellen keine Lerninhalte dar!

2.2.2 Abholzung von tropischem Regenwald

Der LehrplanPLUS verlangt mindestens ein weiteres Beispiel für ökonomische Kosten menschlicher Einflussnahme auf ein Ökosystem. Ich habe den tropischen Regenwald ausgewählt, Sie können auch ein anderes Beispiel nehmen wie z. B. einheimische ***Auen-Biotope*** *oder die* ***Ostsee****. Im eA-Kurs ist zu beachten, dass im Abschnitt 3.1 „Wechselwirkung von Biomen" der Einfluss von Ökosystemen auf das globale Klima explizit behandelt wird. Ich habe dort den tropischen Regenwald als Beispiel gewählt, so dass im eA-Kurs hier besser ein anderes Beispiel für ökonomische Kosten besprochen werden sollte (vgl. Hinweise im Anschluss an den Teilabschnitt 2.2.2).*

Alternatives Thema: Ostsee
Dieses Binnenmeer ist eine ökologische Krisenregion und in mehrfacher Hinsicht bedroht: Klimawandel, Nährstoffeinträge, der Verlust an Biodiversität, Ausbau der Infrastruktur. Das wwf-magazin 02|2025 widmet sich dieser Thematik auf Seite 8-18.
Vgl. auch: https://www.wwf.de/themen-projekte/projektregionen/ostsee

Lied *Banana* (Vielfalter live im KEKK 1986; ©Thomas Nickl) [MP3]; Text dazu [word] [pdf]
Das Lied behandelt die Abholzung von Regenwald zur Produktion von Kaffee, Rindfleisch und „Banana".

Der tropische Regenwald ist die natürliche Vegetation in den inneren Tropen von Süd- und Mittelamerika, Afrika und Asien. Er ist u. a. dadurch charakterisiert, dass er nur eine sehr dünne Humusschicht ausbildet, so dass die Mikronährstoffe sich zum allergrößten Teil in der lebenden Biomasse befinden, während der stark verwitterte Unterboden Wasser und Mikronährstoffe nur in geringem Maß speichern kann.

Kohlenstoff-Speicher:
Die große Biomasse im Regenwald stellt einen gewaltigen Kohlenstoff-Speicher dar. 1950 waren noch 15 % der Landfläche von tropischem Regenwald bedeckt, heute (2024) sind es nur noch 7,4 %, also weniger als die Hälfte. Der Regenwald wird hauptsächlich gerodet, um Agrarflächen für den Anbau beispielsweise von Soja oder Ölpalmen zu gewinnen. Dies geschieht durch Holzeinschlag (wobei ein Teil des Holzes vorläufig als Kohlenstoff-Speicher erhalten bleibt) und durch Brandrodung (wobei der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre freigesetzt wird). Daneben dient der Holzeinschlag der Gewinnung von Tropenholz und dem Bau von Transportwegen dafür.
Auch ohne den Abholzungseffekt speichert der Regenwald inzwischen wesentlich weniger Kohlenstoffdioxid als noch in den 1990er-Jahren und zwar aufgrund des Temperaturanstiegs. Man rechnet damit, dass der Regenwald im Laufe der 2030er-Jahre sogar mehr Kohlenstoffdioxid abgeben könnte, als er aufnimmt.

Einfluss auf Niederschlag und Temperatur:
Ein großer Teil des Regens, der auf tropischen Regenwald niedergeht, verdunstet relativ schnell und sorgt für eine sehr hohe Luftfeuchtigkeit. Man schätzt, dass über dem südamerikanischen

Regenwald jeder Liter Wasser aus dem Atlantik fünf bis sechs Mal verdunstet und erneut herab regnet, bis er den Pazifik erreicht hat. Auf diese Weise sorgt der Regenwald selbst für eine sehr hohe Jahresniederschlagssumme (über 2000 mm/a, z. B. 3000 mm/a in Manaus; das ist etwa drei Mal so viel wie in München). Modellberechnungen zeigen, dass dieser Effekt verloren geht, wenn der Bestand eines Regenwaldgebiets auf 20-25 % verringert wird. Damit wäre ein Kipp-Punkt erreicht, weil der Regenwald für seinen Fortbestand eine hohe Niederschlagssumme benötigt.

Die dichte Wolkendecke verringert die direkte Sonneneinstrahlung und wirkt damit kühlend auf den Regenwald.

2024 wurde festgestellt, dass es im Regenwald einen weiteren Mechanismus zur Verstärkung der Wolkenbildung gibt: Bäume dünsten Terpene aus, die im Baumharz oder in ätherischen Pflanzenölen vorkommen (wir nehmen sie als würzigen Waldgeruch wahr). Die Hauptkomponente dabei ist Isopren mit weltweit 500 bis 600 Tonnen pro Jahr, davon ein Viertel allein im Amazonas-Regenwald. Meistens werden diese Stoffe innerhalb weniger Stunden abgebaut. Dagegen befördern im südamerikanischen Regenwald nächtliche Gewitter das Isopren in bis zu 15 Kilometer Höhe, wo es tagsüber in chemische Verbindungen umgewandelt wird, die sich zu winzigen Partikeln von wenigen Nanometer Durchmessen zusammenlagern. Diese Partikel wachsen mit der Zeit an und bilden Kondensationskeime, an denen sich Wassertröpfchen bilden.

Durch die Vernichtung von tropischem Regenwald verringern sich diese Effekte sehr deutlich. Dies hat noch nicht ganz absehbare Folgen für das globale Klima (Wind- und Niederschlagssysteme). Was mit dem Regenwald geschieht, hat also auch Auswirkungen auf weit davon entfernte Gebiete wie Europa.

In Buchner, Seite 223, M2, ist der Wasserkreislauf im tropischen Regenwald dargestellt.

Eine Abbildung zum Niederschlags-Regime im Amazonas-Regenwald sowie Aufgabenstellungen dazu finden Sie in Biologie heute, Seite 207, Aufgabe 4

Der Umfang des Verlusts von tropischem Regenwald und dessen Auswirkungen auf das Klima sind in Buchner, Seite 223, M3, aufgezeigt.

Im eA-Kurs sollte hier ein anderes Beispiel gewählt werden (wenn bei 3.1. die Vernichtung von tropischem Regenwald thematisiert wird), z. B.:

Einfluss auf die Folgen von Niederschlägen

Im geneigten Gelände fließt Niederschlagswasser beschleunigt ab. In natürlichen Ökosystemen ist das in der Regel kein Problem, weil der Pflanzenbewuchs die Fließgeschwindigkeit deutlich verringert und dadurch ein großer Teil des Wassers im Boden versickert und dort gespeichert wird.

Wenn beispielsweise Bergwald abgeholzt wird (für Straßenbau, Siedlungen, v. a. aber für Schipisten), kann bei Starkregen das herabstürzende Wasser einen Teil des Bodens abtragen, der dann mit den Flüssen ins Meer befördert wird und somit für immer verloren ist. Außerdem kann es zu Hochwasser-Ereignissen kommen, bei denen nicht nur Teile des ufernahen Waldes fortgerissen werden, sondern auch menschliche Siedlungen und Verkehrswege stark geschädigt werden können. Jeder Kubikmeter Wasser, der abfließt, statt im Boden gespeichert zu werden, steht in niederschlagsarmen Zeiten nicht mehr zur Verfügung; Dürreperioden haben dann dramatischere Auswirkungen (Bäume sterben ab und erbringen dann weniger Geldertrag).

Verstärkend wirkt in dieser Hinsicht die Begradigung der Fließgewässer, wodurch Niederschlagswasser schneller abfließt (und damit verloren geht) und gleichzeitig das Flussbett ein-

tieft, so dass Hochwasser die nun zu hoch liegenden Auwälder nicht mehr überfluten kann, die früher als Zwischenspeicher der Wassermassen gedient haben.

2.2.3 Maßnahmen

An dieser Stelle können Formulierungen aus dem LehrplanPLUS zu Maßnahmen des Naturschutzes, die ansonsten eventuell untergehen könnten, zusammengestellt werden, wenn dies noch nicht im Rahmen des Themas „Treibhauseffekt" geschehen ist.

Um die ökonomischen Kosten, die durch Belastung von Ökosystemen entstehen, zu verringern (im Idealfall: zu kompensieren) und auch um das Existenzrecht der in den Ökosystemen lebenden Organismen zu sichern, müssen Maßnahmen ergriffen werden:

- nachhaltige Nutzung: Es sollten nicht mehr Ressourcen entnommen werden, als nachwachsen können. Die Nutzung muss garantieren, dass das Ökosystem kurz- und langfristig intakt bleibt.
- Erhaltungsmaßnahmen: beispielsweise durch Unterschutzstellung, d. h. Einschränkung der Nutzung; auch Maßnahmen zur Erhaltung wichtiger Parameter wie z. B. der Bodenfeuchte
- Renaturierungsmaßnahmen: z. B. Wiedervernässung eines trocken gelegten Moorgebiets (vgl. Abschnitt 2.4)

2.3 Geldwert von Ökosystemen

(ca. 1,5 Stunden für die Abschnitte 2.3 und 2.4)

Inhalte zu den Kompetenzen	***Kompetenzerwartungen:* Die Sch. …**
Monetarisierung von ausgewählten Ökosystemen; Kosten-Nutzen-Analyse von menschlichen Eingriffen (Erhaltungs- und Renaturierungsmaßnahmen); Prozessschutz; Vorteile und Grenzen der ökonomischen Sichtweise; nachhaltige Nutzung, Ökosystemmanagement; Ursache-Wirkungszusammenhänge	vergleichen verschieden stark beeinflusste Ökosysteme nach dem Konzept der Ökosystemleistungen, um den Wert von Erhalt bzw. Renaturierung durch einen Ökosystemmanagementprozess einzuschätzen.

Die LehrplanPLUS-Formulierung dieses Abschnitts im Lernbereich 4.2 erscheint mir unsystematisch und unzusammenhängend. Im Grunde scheint es dabei einerseits um die Monetarisierung von Ökosystemen, eigentlich: von Ökosystemleistungen zu gehen und andererseits um Ökosystem-Management. Die anderen aufgeführten Aspekte scheinen mir Teile dieser beiden Themen zu sein. Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge sollten eigentlich bei sämtlichen ökologischen Betrachtungen herausgestellt werden und können deshalb keinen eigenen Unterpunkt bilden. Erhaltungs- und Renaturierungsmaßnahmen sowie nachhaltige Nutzung habe ich bereits im Abschnitt 2.2 untergebracht. Im Folgenden versuche ich, ein halbwegs praktikables didaktisches Konzept für die noch übrigen Aspekte zu erstellen.

ISB-Handreichung (LIS): Monetarisierung von Ökosystemen (1 Seite)
[Link]
Kurze Erläuterung der Monetarisierung für die Lehrkraft

2.3.1 Monetarisierung von Ökosystemen

Ökosysteme stellen einen Wert für sich dar, denn die in ihnen lebenden Organismen haben ein Existenzrecht. Dieser Aspekt ist aber für die Wirtschaft ohne Belang, für die in der Regel nur Kosten und Nutzen in Geldbeträgen eine Rolle spielen. Um die Belange von Ökosystemen in wirtschaftliche Debatten einbringen zu können, werden Ökosystemleistungen monetarisiert,

d. h. in Geldbeträgen ausgedrückt. Oft bleiben dabei Aspekte, die sich nicht in Geld ausdrücken lassen wie das Existenzrecht von Organismen, unberücksichtigt.

Bei bereitstellenden Ökosystemleistungen funktioniert die Monetarisierung noch am besten, weil dabei die Ökosysteme Produkte bereitstellen, die bereits einen konkreten Marktwert haben.

vgl. dazu die Monetarisierung von Baumindividuen in Buchner, Seite 212, M1

Andere Arten von Ökosystemleistungen sind schwerer zu monetarisieren, vor allem, wenn damit kein unmittelbarer Gewinn erzielt wird. Beispielsweise ist die Bereitsstellung von sauberem Trinkwasser eine klassische Ökosystemleistung; aber in Bayern wird (wie in Thüringen und Hessen) bis heute (2024) kein sogenannter Wassercent erhoben; das ist eine Abgabe für die Entnahme der Ressource Trinkwasser, die in den übrigen Bundesländern bereits erhoben wird.

Nach Abs. 3 Satz 1 der Bayerischen Verfassung und Art. 13 (1) des Waldgesetzes dürfen für das Betreten der Wälder keine Gebühren erhoben werden. Den Erholungswert eines Waldes zu monetarisieren, ist deshalb problematisch. Eine vage Möglichkeit der Erfassung ergibt sich aus Umfragen, was Menschen bereit wären, für Erholung im Wald zu bezahlen. Einfacher ist es dagegen, z. B. über den Zuwachs an Übernachtungen den Wert eines Nationalparks zu monetarisieren.

vgl. dazu die fiktive Inwertsetzung von Ökosystemleistungen in Buchner, Seite 213, M2

Die Bayerische Kompensationsverordnung (BayKompV) monetarisiert Ökosysteme mit Hilfe von Ökopunkten. Wenn beispielsweise durch ein Bauvorhaben ein Biotop zerstört wird, müssen als Ausgleich an anderer Stelle Biotope geschaffen bzw. verbessert werden, bis damit die gleiche Anzahl an Ökopunkten erreicht wird. Auch die Erhaltung wertvoller Biotope kann mit Ökopunkten honoriert werden. Bezüglich der Kontrolle dieser Abläufe dürften allerdings noch einige Fragen offen bleiben.

vgl. dazu ein Beispiel zur Anwendung von Ökopunkten mit Kosten-Nutzen-Betrachtung in Buchner, Seite 213, M3

Die sogenannte CO_2-Abgabe wurde im Januar 2021 in Deutschland eingeführt. Sie soll Anreize schaffen, den Verbrauch fossiler Brennstoffe zu verringern (auch wenn die Mehreinnahmen dazu genutzt werden, Löcher im Bundeshaushalt zu stopfen). Ab dem 1.1.2025 erhöht sich die CO_2-Abgabe von 45 auf 55 Euro pro Tonne Kohlenstoffdioxid. Das macht sich bei den Heizkosten wie auch den Treibstoffpreisen an der Tankstelle sehr deutlich bemerkbar. Damit die Abgabe ihren ökologischen Zweck erfüllen kann, müssen allerdings Alternativen zur Verfügung stehen wie preisgünstige Elektroautos, ein bedarfsgerechter öffentlicher Nahverkehr, Stromgewinnung aus regenierbaren Energiequellen, Geothermie oder grüner Wasserstoff (der mit Hilfe regenerierbarer Energieformen gewonnen wird).

Der Emissionshandel ist ein Marktinstrument, das ebenfalls eine Verringerung des Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes bewirken soll. Dabei wird festgelegt, wie viel Kohlenstoffdioxid in einem bestimmten Zeitraum maximal ausgestoßen werden darf. Dafür stellt der Staat Zertifikate aus, die dann gehandelt werden können. Der Preis pro Tonne entspricht der CO_2-Abgabe. Für ein Unternehmen kann es also kostengünstiger sein, auf klimafreundliche Technologien umzustellen anstatt zusätzliche Zertifikate anzukaufen. Unternehmen wie z. B. Pina Earth bieten Zertifikate aus Wäldern in Deutschland an, wobei mit dem Erlös beispielsweise Fichten-Monokulturen in klimaresiliente Mischwälder umgebaut werden.

2.3.2 Kosten-Nutzen-Betrachtung

Der Lehrplan-Ausdruck „Kosten-Nutzung-Analyse“ ist mir viel zu hoch gegriffen, deshalb spreche ich bescheidener von Kosten-Nutzen-Betrachtung.

Oftmals werden bei einer Kosten-Nutzen-Betrachtung die Kosten seitens der Ökosysteme nicht berücksichtigt. Das ergibt dann eine falsche Bilanz und führt zu falschen Entscheidungen, deren Folgen oft erst nach vielen Jahrzehnten zutage treten. Dann sind die Kosten für die Beseitigung der Schäden oft größer als der ursprüngliche Nutzen.

Ich würde die Kosten-Nutzen-Betrachtung nicht als eigenen Unterpunkt behandeln, sondern an passender Stelle an einem Beispiel abhandeln. Kosten-Nutzen-Betrachtung sollte ohnehin ein mehrfach angewendetes Unterrichtsprinzip darstellen.

Buchner, Seite 214, Abbildung B1, zeigt ein konkretes Beispiel dafür.

2.3.3 Vorteile und Grenzen der Monetarisierung

Die Kursteilnehmer nennen spontan Argumente für und gegen die Monetarisierung von Ökosystemen, z. B.:

Pro:

- Entscheidungshilfe in Wirtschaft und Politik
- ein Geldbetrag macht das Ausmaß eines Schadens anschaulicher
- höhere Wertschätzung von kostenlos zur Verfügung gestellten Ökosystemleistungen
- größere Anreize für Maßnahmen des Naturschutzes
- besserer Vergleich von Ökosystemleistung und technischer Lösung beim selben Problem

Contra:

- einseitige Betrachtung von Ökosystemen als rein wirtschaftliche Ressource; andere Aspekte wie das Existenzrecht der Organismen bleiben außer Acht
- oft problematische Festlegung des Geldwerts einer Ökosystemleistung (Gutachter können vom Auftraggeber beeinflusst sein und je nach dessen Interesse entscheiden)

vgl. dazu Argumente pro und contra in Buchner, Seite 213, M4

Ein noch weiter führender Gedanke, den man ggf. einfließen lassen kann:
„Sind Flüsse Lebewesen?“ *Das ist der Titel eines Buches des Briten Robert Macfarlane, Ullstein 2025, 411 Seiten. Er fragt: Was würde passieren, wenn Flüsse Rechte hätten, demnach als eigenständige Lebewesen betrachtet würden und nicht lediglich als bloße Ressource? Er kritisiert: „Unsere Flüsse werden von der Logik der Verdinglichung und des Gewinns definiert.“ Das Buch ist nicht esoterisch angelegt, sondern politisch. Seine Forderung klingt wie eine Utopie, aber in Neuseeland ist sie längst Realität, denn dort wurde bereits 2017 der Whanganui Fluss auf der Nordinsel per Gesetz zur juristischen Person erklärt. Seine Rechte werden von menschlichen Vertretern wahrgenommen.*

2.4 Ökosystem-Management

Der im LehrplanPLUS genannte Prozess-Schutz ist ein Aspekt von Ökosystem-Management und wird deshalb hier integriert.

Als Prozess-Schutz im engeren Sinne bezeichnet man Maßnahmen, die dafür sorgen, dass sich Prozesse in der Natur ungehindert entfalten können. Das betrifft sowohl rein natürliche Prozesse wie z. B. Sukzession, aber auch vom Menschen beeinflusste Prozesse wie Wiedervernässung

von Mooren, Beweidung vom Almen (wodurch Wiederbewaldung verhindert wird) oder Haltung von Weidetieren in der Kernzone eines Nationalparks.

Nationalparks besitzen eine Kernzone, die weitgehend sich selbst überlassen wird. Damit sie vor anthropogenen Einflüssen weitgehend geschützt ist, wird die Kernzone von einer Randzone mit eingeschränkter Nutzung umgeben.

Beispiel: Im Nationalpark Bayerischer Wald ergriff man in der Kernzone keine Maßnahmen gegen den anfangs sehr starken Befall durch den Borkenkäfer, sehr zum Unwillen der dortigen Bevölkerung und der Besitzer der angrenzenden Waldgebiete. Aber die Rechnung ging auf: Weil große Fichtenbestände zusammen gebrochen waren, entstand viel Platz für den aufkeimenden Jungwuchs vieler Baumarten, so dass jetzt an der gleichen Stelle ein standortgemäßer Mischwald heranwächst.

Unter Prozess-Schutz im weiteren Sinne versteht man Maßnahmen zum Erhalt von Prozessen, die dem Erhalt einer vom Menschen genutzten Kulturlandschaft dienen, wobei insbesondere der Naturschutz gefördert wird.

Beispiel: Weil Moore beachtliche Mengen an Kohlenstoffdioxid auf sehr lange Zeit binden können, gibt es für die Renaturierung einer ehemaligen Moorfläche Ökopunkte. Für eine Wiedervernässung werden Entwässerungsgräben (Dränagen) verschlossen. Dabei gehen Wiesen und Äcker auf solchen Flächen verloren, aber es ist sogenannte Paludikultur (*palus*, lateinisch: Sumpf, Morast) möglich, in der z. B. Schilf als Rohstoff für Zellulosefasern gewonnen bzw. Wasserbüffel gehalten werden können (in der Ökostation Kloster Benediktbeuern wird letzteres bereits praktiziert).

vgl. dazu „Ökosystemmanagement im Wald“ in Buchner, Seite 215, M2; zu Nationalparks vgl. Buchner, Seite 216, M1

vgl. dazu „Moore erhalten und renaturieren“ in Buchner, Seite 215, M3

2.5 Bewertung aus unterschiedlichen Standpunkten

(ca. 1 Stunde)

Inhalte zu den Kompetenzen	***Kompetenzerwartungen:* Die Sch. …**
anthropozentrische Bewertung der Natur; ökologischer Fußabdruck; Notwendigkeit einer Werteabwägung	reflektieren die anthropozentrische Bewertung der Natur und sind sich dadurch der Notwendigkeit einer Werteabwägung bewusst.

Die Reflexion der anthropozentrischen Bewertung der Natur ist Teil der Gegenüberstellung in Teilabschnitt 2.3.3, soll aber hier nochmal aufgegriffen werden und zwar breiter gesehen. Auch die Notwendigkeit einer Werteabwägung wurde in den vorigen Abschnitten bereits thematisiert. Mir ist nicht klar, was hier vom LehrplanPLUS inhaltlich eigentlich an Neuem verlangt wird bzw. ob überhaupt. Vielleicht soll einfach zum Abschluss des Lernbereichs 4.2 ein wertender Rückblick vorgenommen werden.

Die anthropozentrische Bewertung der Natur rein nach dem unmittelbaren oder mittelbaren Nutzen, den Ökosysteme für den Menschen bringen, vernachlässigt vor allem die Werte, die das Ökosystem selbst betreffen, v. a. das Existenzrecht der dort lebenden Organismen.

Deshalb ist eine ehrliche Abwägung sämtlicher Werte notwendig (weil die Menschen nicht ohne und nicht gegen die Natur leben können), aber auch ethisch gefordert.

Am besten wird dieser Gedanke an einem konkreten Beispiel abgehandelt, z. B.:

Nationalpark Rhön ja oder nein?

Die Rhön ist ein Mittelgebirge in Hessen, Bayern und Thüringen. Große Teile davon wurden 1991 von der UNESCO als Biosphärenreservat anerkannt. Der Freistaat Bayern plante, dort einen dritten bayerischen Nationalpark (nach den Nationalparks Bayerischer Wald und Berchtesgaden) auszuweisen. Das würde eine deutlich strengere Unterschutzstellung, vor allem in der Kernzone, bedeuten. Ökologisch interessant wäre dabei, dass in der Rhön Laubwälder, dominiert von der Rotbuche, wachsen, während die bereits bestehenden bayerischen Nationalparks vorwiegend mit Nadelbäumen bestanden sind. Die meisten Gemeinden und Städte in der Rhön lehnten aber 2018 die Ausweisung eines Nationalparks aufgrund wirtschaftlicher Bedenken ab.

Der Bund Naturschutz, der sich für das Nationalpark-Projekt einsetzt, hat auf einer Webseite die wichtigsten Fakten und Argumente zu einem Nationalpark Rhön zusammengestellt:
https://bad-kissingen.bund-naturschutz.de/aktuelles/nationalpark-rhoen

Allgemeine Informationen zu Nationalparks in Deutschland sind zusammengestellt in Buchner, Seite 216, M1, und Argumente für ein Diskussionsforum zu einer Abstimmung über eine Unterschutzstellung als Nationalpark finden Sie in Buchner, Seite 217, M2

2.6 Ökologischer Fußabdruck (nur eA-Kurs)

(ca. 1 Stunde)

Der ökologische Fußabdruck sollte den Kursteilnehmern bereits aus der 8. Klasse bekannt sein (Lernbereich 6), aber sie werden die Thematik jetzt mit anderem intellektuellen Hintergrund betrachten, vor allem sollten Stärken und Schwächen dieses Modells diskutiert werden.

Der ökologische Fußabdruck entspricht der biologisch produktiven Fläche auf der Erde, die nötig ist, um die Ansprüche eines einzelnen Menschen dauerhaft zu decken. Darin enthalten sind Flächen für die Produktion von Kleidung und Nahrung bzw. zur Bereitstellung von Energie, aber auch für die Entsorgung von Müll oder zum Binden von freigesetztem Kohlenstoffdioxid. Die Maßeinheit ist der globale Hektar (gha) pro Person und Jahr, wobei der weltweite Durchschnitt an Boden-Fruchtbarkeit zugrunde gelegt wird. Der individuelle ökologische Fußabdruck kann mit der gesamten biologischen Kapazität der Erde (in gha) verglichen werden.

Beispiele (Angaben in gha pro Person und Jahr):

Afrika	1,4	Brasilien	3,02	VR China	3,59
Europa	4,87	Kanada	8,76	Indien	1,06
Nordamerika	8,61	USA	8,59	Deutschland	5,00

Derzeit (2024) beträgt der globale Fußabdruck im weltweiten Durchschnitt 2,87 gha, es stehen im weltweiten Durchschnitt allerdings nur 1,71 gha zur Verfügung. Die Inanspruchnahme überschreitet die Kapazitäten also um 68 %.

Die Kursteilnehmer sollten auf jeden Fall Gelegenheit haben, ihren eigenen ökologischen Fußabdruck mit einem Programm im Internet zu bestimmen, am besten mehrmals mit unterschiedlichen Szenarien für künftiges Verhalten. Sie werden dabei feststellen, dass der geringste Wert, den sie dabei in Deutschland theoretisch erreichen können, immer noch höher ist als die biologische Kapazität der Erde. Das liegt daran, dass der persönliche ökologische Fußabdruck

nicht nur vom eigenen Verhalten abhängt, sondern z. B. auch von den Produktionsbedingungen, unter denen Konsumgüter hergestellt werden.

- http://www.fussabdruck.de (Brot für die Welt)
- http://www.footprint-deutschland.de (BUND-Jugend)
- http://www.mein-fussabdruck.at (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreich)

ALP Seite 10_2_v33: Ökologischer Fußabdruck

Die Kursteilnehmer stellen die Stärken und Schwächen des Modells gegenüber:

Stärken:

- Wegen der starken Vereinfachung ist der ökologische Fußabdruck leicht zu verstehen und leicht zu kommunizieren.
- Der globale Hektar ist anschaulich und lässt sich leicht visualisieren.
- Es sind einfache Vergleiche zwischen verschiedenen Regionen möglich; das Individuum kann sich im Verhältnis zum Durchschnitt seines Landes einordnen.
- Es werden keine Szenarien mit künftigen Veränderungen berücksichtigt, die das Modell verkomplizieren würden.
- Weil die Methodik nie verändert wurde, lassen sich Werte über viele Jahrzehnte miteinander vergleichen.

Schwächen:

- Die Reduktion auf eine einzige Größe (Fläche) stellt eine sehr grobe Vereinfachung dar.
- Einige Faktoren werden nicht berücksichtigt wie Wasserverbrauch, Biodiversität, nicht erneuerbare Ressourcen, Giftstoffe.
- Die Verantwortung wird einem einzelnen Individuum zugeordnet. Das lenkt von der Verantwortung von Regierungen oder Industriekonzernen ab. (Es ist kein Zufall, dass der Mineralölkonzern BP das 1994 geschaffene Konzept des ökologischen Fußabdrucks weltweit publik gemacht hat.)
- Es wird nicht berücksichtigt, dass die gesellschaftliche Situation einen Rahmen vorgibt, innerhalb dessen eine Einzelperson handeln kann; sie kann ihren ökologischen Fußabdruck also nicht beliebig senken.

Es gibt Varianten des ökologischen Fußabdrucks:

– Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck in Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten (CO_2e);
vgl. Buchner, Seite 220, M1

– Wasser-Fußabdruck

– Biodiversitäts-Fußabdruck

– ökologischer Handabdruck: Im Gegensatz zum Fußabdruck, der die Belastung angibt, umfasst der Handabdruck positive Auswirkungen auf die ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit bei der Produktion von Gütern sowie Maßnahmen, die dazu beitragen, dass auch andere Personen ihren ökologischen Fußabdruck verringern.
vgl. Buchner, Seite 221, M3