minærva

GL 5

SKRIPT

Klimawandel und nachhaltige Entwicklung

Erklärskript

Die Aufgaben 189–232 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Geographie – Leistungsfach Kursstufe

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe GL · Geographie-Leistungsfach

GL1	GL2	GL3	GL4	GL5	GL6	GL7	GL-K
Endogene Prozesse	Landschaften	Atmosphäre	Wasser, Böden	Klimawandel	Bevölkerung, Stadt	Disparitäten	Kompakt

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen zu jedem Abschnitt, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Geographie-Leistungsfach: sieben Themenskripte GL1–GL7 mit dem Stoff, aber ohne Aufgaben. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans er gehört und ob er zum Schwerpunkt der schriftlichen Abiturprüfung zählt.
Aufgabenskript	Ein gemeinsames Aufgabenskript für alle Themen. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es in der Reihe nur einmal.
Lösungsskript	Die Lösungen zu allen Aufgaben, mit denselben Nummern.
Kompakt	GL-K: alle Fachbegriffe, Modelle und wichtigen Abbildungen auf wenigen Seiten, zum schnellen Wiederholen.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Worum es geht 4
1 Globale Herausforderungen 5
1.1 Merkmale globaler Herausforderungen 5
1.2 Vier Beispiele 5
1.3 Planetare Grenzen 6
2 Leitidee nachhaltige Entwicklung 8
2.1 Von Brundtland bis zur Agenda 2030 8
2.2 Dimensionen und Modelle 8
2.3 Problemlösungs- und Zukunftsorientierung 9
3 Klimasystem und natürlicher Treibhauseffekt 11
3.1 Das Klimasystem 11
3.2 Strahlungshaushalt der Erde 11
3.3 Treibhausgase und natürlicher Treibhauseffekt 12
3.4 Natürliche Klimaänderungen 12
4 Anthropogener Klimawandel: Ursachen und Dimensionen 14
4.1 Der anthropogene Treibhauseffekt 14
4.2 Kohlenstoffkreislauf und Emissionen 14
4.3 Belege für den menschlichen Einfluss 16
4.4 Globale Durchschnittstemperatur 16
4.5 Dimensionen des Klimawandels 17
5 Klimaszenarien und Kippelemente 19
5.1 Klimamodelle und Szenarien 19
5.2 Kippelemente 20
6 Raumbeispiel Arktis 22
6.1 Lage und Klima 22
6.2 Beobachtete Veränderungen 22
6.3 Wirkungsgefüge: Warum gerade die Arktis? 23
6.4 Folgen für Menschen und Raumnutzung 23
6.5 Szenarien für die Arktis 24
7 Raumbeispiel Bangladesch 25
7.1 Lage und Klima 25
7.2 Klimafolgen im Delta 25
7.3 Verwundbarkeit und Anpassung 26
7.4 Szenarien und Vergleich 26
7.5 Zum Vergleich: Alpen und Baden-Württemberg 27
8 Klimaschutz: Ziele und Maßnahmen 28
8.1 Globale Ebene: vom Rio-Gipfel zum Übereinkommen von Paris 28
8.2 Europäische Ebene 28
8.3 Nationale Ebene: Deutschland 29
8.4 Regionale und kommunale Ebene: Baden-Württemberg und Gemeinden 29
8.5 Reduktion der Treibhausgase: Handlungsfelder 30
8.6 Kohlenstoffdioxid-Senken 30
8.7 Geo-Engineering 30
9 Anpassung an den Klimawandel 32
9.1 Verwundbarkeit 32
9.2 Anpassung auf verschiedenen Maßstabsebenen 32
9.3 Bewertung von Anpassungsmaßnahmen 33
10 Klimaneutral leben und arbeiten 34
10.1 Klimaneutralität 34
10.2 Ökologischer Fußabdruck und CO_2-Bilanz 34
10.3 Lokale Agenda 21 35
10.4 Handlungsansätze entwickeln 35

Worum es geht

Die Jahre 2023, 2024 und 2025 waren die drei wärmsten seit Beginn der Messungen; im Mittel lagen sie erstmals über jener Marke, die im Übereinkommen von Paris als Grenze genannt ist: 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau. Gletscher in den Alpen verlieren in einem einzigen Jahr Prozente ihres Volumens, in Bangladesch dringt Salzwasser in die Reisfelder, in Sibirien kippen Häuser, weil der gefrorene Boden unter ihnen auftaut. Gleichzeitig haben fast alle Staaten der Erde beschlossen, ihre Treibhausgasemissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts auf netto null zu senken, und Deutschland will das schon 2045 erreichen.

Der Klimawandel ist das bekannteste Beispiel für eine **globale Herausforderung**: ein Problem, das alle betrifft, das kein Staat allein lösen kann und bei dem Verursacher und Betroffene oft weit auseinanderliegen. Dieses Skript beginnt deshalb mit der Frage, was globale Herausforderungen ausmacht und was „nachhaltige Entwicklung“ als Leitidee bedeutet. Danach geht es um die Ursachen des Klimawandels nach dem heutigen Stand der Wissenschaft, um seine Folgen und Szenarien an zwei Raumbeispielen (Arktis und Bangladesch), um Klimaschutz und Anpassung auf allen Maßstabsebenen von der UN bis zur Gemeinde und schließlich um die Frage, wie man selbst klimaneutral leben und arbeiten kann.

Die physikalischen Grundlagen (Strahlung, Energiebilanz, Wärmekapazität des Ozeans) stehen ausführlicher im Physik-Skript P9 „Klima“ der Sek-I-Reihe; hier werden sie nur so weit wiederholt, wie man sie für die geographische Betrachtung braucht. Alle aktuellen Zahlen sind mit ihrer Quelle angegeben. Sie ändern sich von Jahr zu Jahr: Wer dieses Skript später liest, sollte die Werte für Temperatur, CO_2-Gehalt und Emissionen bei den genannten Stellen nachschlagen.

> **Klimawandel und nachhaltige Entwicklung im Lehrplan.** Bildungsplan Geographie, Leistungsfach: 3.5.3.1; 3.5.3.2 (1)–(4). Die Marken unter den Überschriften sagen genau, welcher Abschnitt zu welcher Teilkompetenz gehört.

Lehrplan-Marken. Unter jeder Abschnittsüberschrift steht, zu welcher Teilkompetenz des Bildungsplans Geographie (Baden-Württemberg 2016, Leistungsfach, Abschnitt 3.5) der Abschnitt gehört, z. B. `BP 3.5.2.2 (1)` . Die Marke `Abi 2027` zeigt die Schwerpunkte der schriftlichen Abiturprüfung 2027. Sie wechseln von Jahr zu Jahr; alles andere bleibt Stoff des Leistungsfachs und kann mündlich geprüft werden.

Die Aufgaben zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript der Reihe, die Lösungen im Lösungsskript. Jedes Kapitel endet mit den Fachbegriffen des Bildungsplans und mit einem Verweis auf passende Übungen in **noctua**.

1 Globale Herausforderungen

BP 3.5.3.1 (1)

Was haben das Abschmelzen der Gletscher, der Streit um das Wasser des Nils, das Wachstum von Lagos und die Armut im Sahel gemeinsam? Auf den ersten Blick wenig: Es sind Vorgänge in ganz verschiedenen Räumen, mit ganz verschiedenen Ursachen. Auf den zweiten Blick zeigen sie ein gemeinsames Muster. Sie wirken über Staatsgrenzen hinweg, hängen miteinander zusammen und lassen sich nicht mehr an einem Ort allein lösen. Für solche Probleme hat sich der Begriff **globale Herausforderung** eingebürgert.

1.1 Merkmale globaler Herausforderungen

Nicht jedes große Problem ist eine globale Herausforderung. Ein schweres Erdbeben ist eine Katastrophe, aber es ist räumlich begrenzt. Globale Herausforderungen lassen sich an mehreren Merkmalen erkennen, die meist gleichzeitig auftreten:

a) **Weltweite Reichweite:** Ursachen oder Folgen betreffen viele Staaten oder die ganze Erde. Treibhausgase verteilen sich innerhalb weniger Jahre in der gesamten Atmosphäre, gleichgültig, wo sie ausgestoßen wurden.
b) **Vernetzung:** Die Herausforderungen verstärken einander. Der Klimawandel verschärft Wasserknappheit, Wasserknappheit verschärft Armut, Armut treibt Menschen in die Städte, und das schnelle Wachstum der Städte verschärft deren Verwundbarkeit gegenüber Hitze und Starkregen.
c) **Räumliche und zeitliche Entkopplung von Ursache und Wirkung:** Wer die Ursachen setzt, ist oft nicht der, der die Folgen trägt. Die Industrieländer haben den größten Teil der bisherigen Treibhausgase ausgestoßen, die stärksten Folgen treffen aber häufig arme Länder in den Tropen. Und die Folgen heutiger Emissionen treffen vor allem künftige Generationen.
d) **Gemeingüter:** Viele globale Herausforderungen betreffen Güter, die allen gehören und deshalb von niemandem geschützt werden, etwa die Atmosphäre, die Hohe See oder die Artenvielfalt. Jeder Einzelne hat einen Vorteil, wenn er das Gemeingut nutzt, den Schaden tragen alle. Dieses Dilemma heißt **Tragik der Allmende**.
e) **Lösung nur gemeinsam:** Kein Staat kann das Problem allein lösen. Nötig sind internationale Abkommen, aber auch Beiträge auf allen Ebenen darunter, bis hin zum Einzelnen.
f) **Langfristigkeit und Unsicherheit:** Die Prozesse laufen über Jahrzehnte, manche sind unumkehrbar. Wer heute handeln muss, muss deshalb mit Wahrscheinlichkeiten und Szenarien arbeiten, nicht mit Gewissheiten.

Definition

Eine **globale Herausforderung** ist ein Problem von weltweiter Reichweite, das mit anderen Problemen eng vernetzt ist, dessen Ursachen und Folgen räumlich und zeitlich oft auseinanderliegen und das nur durch Zusammenarbeit auf mehreren Maßstabsebenen gelöst werden kann.

1.2 Vier Beispiele

Der Bildungsplan nennt vier Beispiele. Sie sind zugleich die großen Themen der Kursstufe: Der Klimawandel ist Gegenstand dieses Skripts, Stadtentwicklung steht in GL6, Disparitäten in GL7.

- **Klimawandel**: die vom Menschen verursachte Veränderung des Klimas, vor allem die Erwärmung durch zusätzliche Treibhausgase. Er ist das Paradebeispiel einer globalen Herausforderung, weil ein Gemeingut (die Atmosphäre) betroffen ist und Verursacher und Betroffene besonders weit auseinanderliegen.
- **Ressourcenknappheit**: Natürliche Ressourcen wie Süßwasser, fruchtbarer Boden, Wald, Fischbestände, Erze und fossile Energieträger werden schneller verbraucht, als sie sich erneuern oder als Ersatz gefunden wird. Knappheit ist dabei oft eine Frage der Verteilung: Weltweit gibt es genug Süßwasser, aber nicht dort, wo es gebraucht wird, und nicht für alle bezahlbar.
- **Stadtentwicklung**: Seit 2007 lebt mehr als die Hälfte der Menschheit in Städten. Vor allem in Afrika und Südasien wachsen Städte so schnell, dass Wohnraum, Wasserversorgung, Abwasserentsorgung und Verkehr nicht mithalten. Städte sind zugleich Hauptverursacher von Emissionen und besonders verwundbar.
- **Disparität**: ungleiche Lebensbedingungen zwischen Räumen, etwa zwischen Ländern des Globalen Nordens und des Globalen Südens, zwischen Stadt und Land oder innerhalb einer Stadt. Disparitäten verstärken die anderen Herausforderungen, weil arme Menschen sich schlechter schützen und anpassen können.

Abbildung 129 zeigt, wie eng die vier Beispiele zusammenhängen. In der Mitte steht die Leitidee, mit der man allen zugleich begegnen will: nachhaltige Entwicklung (nächstes Kapitel).

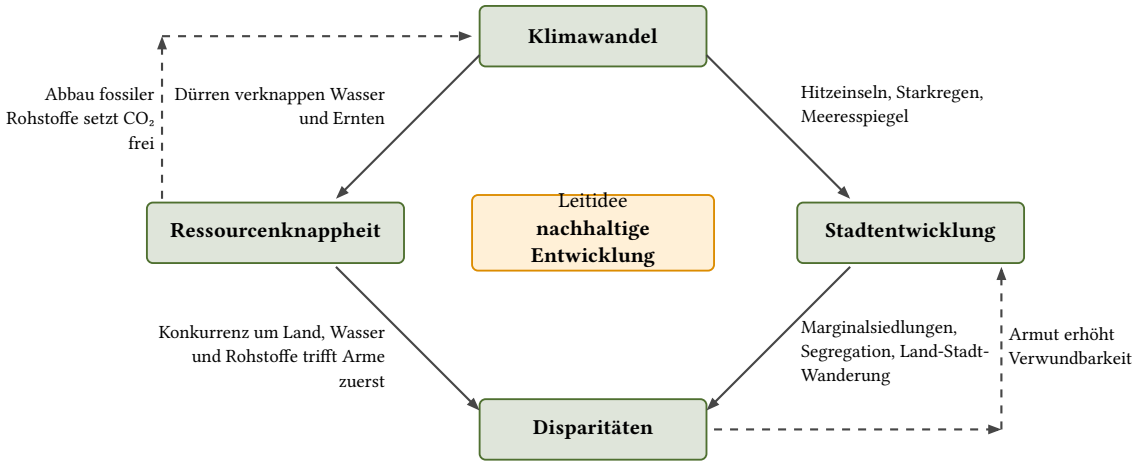


Abbildung 129: Die vier globalen Herausforderungen des Bildungsplans als Wirkungsgefüge (Auswahl der Beziehungen).

1.3 Planetare Grenzen

Ein Ansatz, globale Herausforderungen messbar zu machen, sind die **planetaren Belastungsgrenzen**. Eine Gruppe um den schwedischen Umweltforscher Johan Rockström schlug 2009 neun Prozesse des Erdsystems vor, die die Stabilität des Planeten regeln, und für jeden eine Grenze, innerhalb derer die Menschheit „sicher" handeln kann. Wird eine Grenze überschritten, steigt das Risiko großer, womöglich unumkehrbarer Veränderungen.

Nach dem **Planetary Health Check 2025** des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung sind sieben der neun Grenzen überschritten (Abbildung 130). Neu hinzugekommen ist 2025 die Versauerung der Ozeane: Das Meer nimmt einen Teil des ausgestoßenen CO_2 auf, dabei entsteht Kohlensäure, und der pH-Wert sinkt. Innerhalb der Grenzen liegen nur noch die Ozonschicht, die sich seit dem Verbot der FCKW im Montrealer Protokoll von 1987 erholt, und die Belastung der Luft mit Aerosolen im weltweiten Mittel.

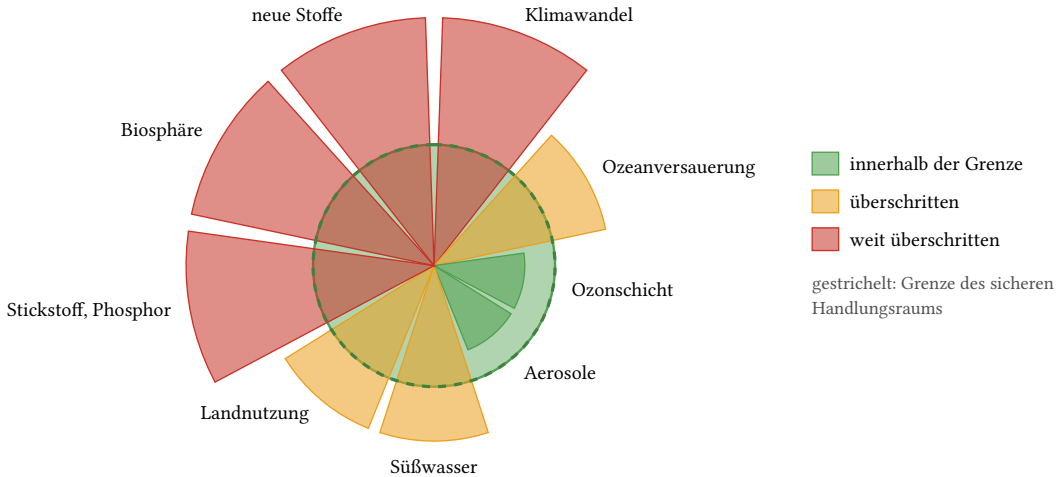


Abbildung 130: Planetare Belastungsgrenzen, schematisch. Länge der Sektoren nur qualitativ. Einordnung nach dem Planetary Health Check 2025 (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung).

Das Ozon-Beispiel zeigt übrigens, dass globale Herausforderungen lösbar sind: Ein verbindliches Abkommen, technische Alternativen und eine klare Verantwortung der Industrie haben gereicht. Beim Klimawandel ist es schwieriger, weil fossile Energie in fast jedem Bereich des Lebens steckt.

Herausforderung oder Krise?

In Medien und Politik ist oft von „Klimakrise" die Rede. Der Bildungsplan spricht neutral von „Herausforderung". Der Unterschied ist nicht nur sprachlich: Eine Krise ist ein zugespitzter Zustand, der vorübergeht; eine Herausforderung verlangt dauerhaft Antworten. Im Abitur werden Fachbegriffe erwartet; wer „Krise" schreibt, sollte das begründen.

Fachbegriffe des Bildungsplans

Disparität Ungleichheit der Lebensbedingungen zwischen Räumen (Staaten, Regionen, Stadtvierteln).
globale Herausforderung weltweites, mit anderen vernetztes Problem, dessen Ursachen und Folgen räumlich und zeitlich auseinanderliegen und das nur gemeinsam lösbar ist.
Klimawandel vom Menschen verursachte, langfristige Veränderung des Klimas, vor allem die Erwärmung durch Treibhausgase.
Ressourcenknappheit natürliche Ressourcen werden schneller verbraucht, als sie sich erneuern, oder sind ungleich verteilt.
Stadtentwicklung Wachstum und Umbau von Städten, weltweit eine der großen Aufgaben wegen der schnellen Verstädterung.

Üben: **noctua** ↗

2 Leitidee nachhaltige Entwicklung

BP 3.5.3.1 (2)

Das Wort „nachhaltig“ stammt aus der Forstwirtschaft. Der sächsische Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz forderte 1713, man solle nur so viel Holz schlagen, wie nachwachsen kann, damit es eine „continuirliche beständige und nachhaltende Nutzung“ der Wälder gebe. Heute ist **nachhaltige Entwicklung** die Leitidee der internationalen Umwelt- und Entwicklungspolitik und der Maßstab, an dem man Maßnahmen gegen globale Herausforderungen misst.

2.1 Von Brundtland bis zur Agenda 2030

Die heute meist zitierte Definition stammt aus dem Bericht „Unsere gemeinsame Zukunft“ der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung von 1987, nach ihrer Vorsitzenden, der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland, **Brundtland-Bericht** genannt:

Definition

Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können (Brundtland-Bericht, 1987, sinngemäß).

In der Definition stecken zwei Gerechtigkeitsideen: **Generationengerechtigkeit** (die Heutigen dürfen den Künftigen keine schlechtere Welt hinterlassen) und **globale Gerechtigkeit** (die „Bedürfnisse der heutigen Generation“ meinen ausdrücklich auch die der Armen).

Die wichtigsten Stationen danach:

- **1992, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro:** Die Staaten beschließen die **Agenda 21**, ein Aktionsprogramm für das 21. Jahrhundert, dazu die Klimarahmenkonvention und die Konvention über die biologische Vielfalt. Kapitel 28 der Agenda 21 ruft die Kommunen auf, mit ihren Bürgern eine eigene **Lokale Agenda 21** zu erarbeiten (Kapitel 10 dieses Skripts).
- **2000, Millenniums-Entwicklungsziele:** acht Ziele bis 2015, vor allem zur Bekämpfung der extremen Armut, gerichtet an die Entwicklungsländer.
- **2015, Agenda 2030:** Die Generalversammlung der Vereinten Nationen beschließt am 25. September 2015 die 17 **nachhaltigen Entwicklungsziele / Sustainable Development Goals** (SDGs) mit 169 Unterzielen. Sie gelten anders als die Millenniumsziele für **alle** Staaten, also auch für Deutschland, und verbinden Armutsbekämpfung mit Umwelt- und Klimaschutz.

Nr.	Ziel (Kurzform)	Nr.	Ziel (Kurzform)
1	keine Armut	10	weniger Ungleichheiten
2	kein Hunger	11	nachhaltige Städte und Gemeinden
3	Gesundheit und Wohlergehen	12	nachhaltiger Konsum und Produktion
4	hochwertige Bildung	**13**	**Maßnahmen zum Klimaschutz**
5	Geschlechtergleichheit	14	Leben unter Wasser
6	sauberes Wasser und Sanitärversorgung	15	Leben an Land
7	bezahlbare und saubere Energie	16	Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen
8	menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum	17	Partnerschaften zur Erreichung der Ziele
9	Industrie, Innovation und Infrastruktur		

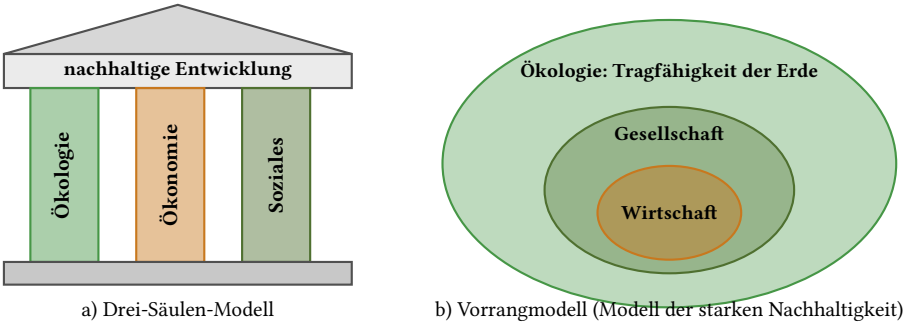
Tabelle 19: Die 17 Ziele der Agenda 2030 (Vereinte Nationen, 2015). Ziel 13 verlangt, „umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen zu ergreifen“.

Wie steht es um die Ziele? Der Bericht der Vereinten Nationen von 2025 bewertet 139 Unterziele mit ausreichender Datenlage: Nur etwa 35 % sind auf Kurs oder machen zumindest mäßige Fortschritte, 48 % kommen zu langsam voran, und 18 % haben sich gegenüber 2015 sogar verschlechtert. Gründe sind unter anderem die Corona-Pandemie, Kriege, Schulden vieler armer Länder und die Folgen des Klimawandels selbst.

2.2 Dimensionen und Modelle

Nachhaltigkeit wird meist in drei **Dimensionen** gedacht: ökologisch (die natürlichen Lebensgrundlagen erhalten), ökonomisch (dauerhaft tragfähig wirtschaften, Wohlstand sichern) und sozial (Grundbedürfnisse befriedigen,

Gerechtigkeit, Teilhabe). Häufig kommt als vierte Dimension die **politische** hinzu: gute Regierungsführung, Beteiligung der Bürger, Rechtsstaatlichkeit. Wie sich die Dimensionen zueinander verhalten, beschreiben zwei Modelle (Abbildung 131).



a) Drei-Säulen-Modell b) Vorrangmodell (Modell der starken Nachhaltigkeit)

Abbildung 131: Zwei Modelle der Nachhaltigkeit. a) Drei gleichrangige Säulen tragen das Dach. b) Wirtschaft und Gesellschaft sind nur innerhalb der Tragfähigkeit der Natur möglich.

- Im **Drei-Säulen-Modell** sind die Dimensionen gleichrangig. Es betont, dass ökologische Ziele nicht auf Kosten von Arbeitsplätzen und sozialer Sicherheit gehen sollen. Kritiker wenden ein, dass es Zielkonflikte verdeckt und erlaubt, Naturverlust durch Wirtschaftswachstum „auszugleichen" (**schwache Nachhaltigkeit**).
- Im **Vorrangmodell** (auch Modell der **starken Nachhaltigkeit**) bilden die ökologischen Grenzen den Rahmen, innerhalb dessen sich Gesellschaft und Wirtschaft entwickeln können. Natur ist nur begrenzt durch Kapital ersetzbar: Ein ausgestorbenes Ökosystem lässt sich nicht zurückkaufen. Die planetaren Grenzen aus Kapitel 1 folgen dieser Denkweise.

Zwischen den Dimensionen gibt es **Zielkonflikte**. Ein Beispiel aus Baden-Württemberg: Ein Windpark auf einem Schwarzwaldkamm dient dem Klimaschutz (ökologisch) und bringt der Gemeinde Pachteinnahmen (ökonomisch), kann aber Vögel und Fledermäuse gefährden (ökologisch) und stößt bei Anwohnern auf Widerstand (sozial). Nachhaltige Entwicklung heißt nicht, dass es keine Verlierer gibt, sondern dass Entscheidungen alle Dimensionen offen abwägen.

2.3 Problemlösungs- und Zukunftsorientierung

Der Bildungsplan verlangt, die Leitidee „im Sinne einer Problemlösungs- und Zukunftsorientierung" zu erläutern. Gemeint sind zwei Haltungen, die auch die Geographie als Fach prägen:

- **Problemlösungsorientierung**: Nachhaltige Entwicklung bleibt nicht bei der Beschreibung von Problemen stehen, sondern fragt nach Lösungen: Welche Maßnahmen gibt es? Wer muss handeln? Welche Wirkungen und Nebenwirkungen haben sie? Im Unterricht heißt das: Maßnahmen an Kriterien messen und bewerten, eigene Lösungsvorschläge entwickeln.
- **Zukunftsorientierung**: Entscheidungen werden daraufhin geprüft, wie sie in Jahrzehnten wirken. Das verlangt, mit Szenarien zu arbeiten (Kapitel 5), Unsicherheit anzuerkennen und Vorsorge zu treffen, bevor Schäden eingetreten sind (**Vorsorgeprinzip**).

Merksatz

Nachhaltige Entwicklung ist eine **regulative Idee**: ein Maßstab, an dem man Handlungen misst, kein fertiger Zustand. Sie verbindet Gerechtigkeit zwischen den Generationen und weltweit, berücksichtigt ökologische, ökonomische und soziale Ziele, legt Zielkonflikte offen und richtet sich auf Lösungen und auf die Zukunft.

Für die Bewertung von Maßnahmen gegen den Klimawandel (Kapitel 8 und 9) lässt sich aus der Leitidee ein Prüfraster ableiten: Ist die Maßnahme **wirksam** (wie viel Treibhausgas spart sie, wie viel Schaden verhindert sie)? Ist sie **ökologisch verträglich** (Nebenwirkungen auf Boden, Wasser, Artenvielfalt)? Ist sie **wirtschaftlich tragfähig** (Kosten je Tonne CO_2, Arbeitsplätze)? Ist sie **sozial gerecht** (wer zahlt, wer profitiert, wer wird belastet)? Ist sie **dauerhaft** und **politisch durchsetzbar**?

Fachbegriffe des Bildungsplans

nachhaltige Entwicklung Entwicklung, die die Bedürfnisse der Heutigen befriedigt, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden (Brundtland 1987).

nachhaltige Entwicklungsziele (SDGs) die 17 Ziele der Agenda 2030 der Vereinten Nationen (2015) mit 169 Unterzielen, gültig für alle Staaten.

Problemlösungsorientierung Haltung, die nach Lösungen, Akteuren und Wirkungen von Maßnahmen fragt, statt nur Probleme zu beschreiben.

Zukunftsorientierung Ausrichtung von Entscheidungen auf ihre langfristigen Folgen, mit Szenarien und Vorsorge.

Üben: **noctua** ↗

3 Klimasystem und natürlicher Treibhauseffekt

BP 3.5.3.2 (1) Abi 2027

Um den Klimawandel zu verstehen, muss man zuerst verstehen, wovon das Klima der Erde abhängt. Wetter ist der augenblickliche Zustand der Atmosphäre an einem Ort; **Klima** ist die Statistik des Wetters über einen langen Zeitraum, nach Festlegung der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) über mindestens 30 Jahre. Klima umfasst nicht nur Mittelwerte, sondern auch Schwankungen und Extreme: Wie oft gibt es Hitzetage, wie stark regnet es an einem Starkregentag? Ein kalter Winter widerlegt den Klimawandel so wenig, wie ein heißer Sommer ihn beweist.

3.1 Das Klimasystem

Das Klima entsteht im Zusammenspiel mehrerer Teilsysteme der Erde, die Energie, Wasser und Kohlenstoff austauschen (Abbildung 132). Angetrieben wird alles von der Strahlung der Sonne.

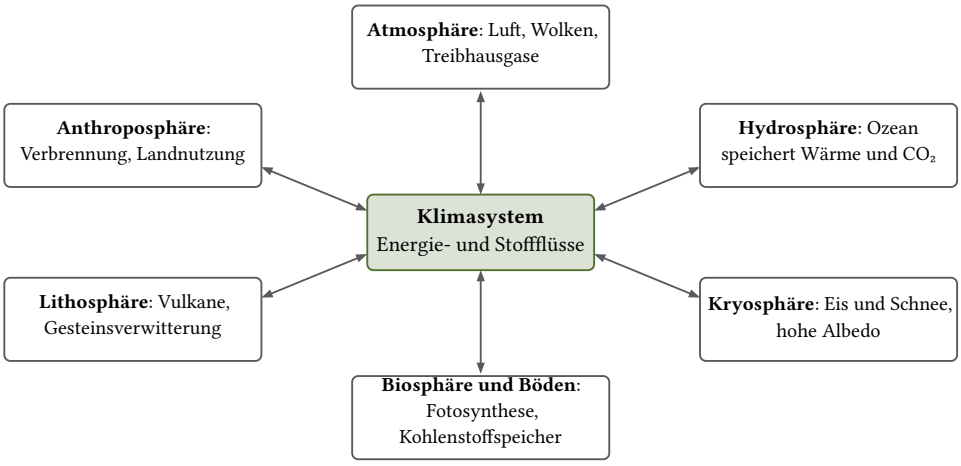


Abbildung 132: Das Klimasystem: Teilsysteme der Erde, die Energie und Stoffe austauschen.

Die Teilsysteme reagieren sehr unterschiedlich schnell. Die Atmosphäre ändert sich innerhalb von Tagen, die oberen Schichten des Ozeans in Jahren, der tiefe Ozean und die großen Eisschilde in Jahrhunderten bis Jahrtausenden. Diese **Trägheit** ist wichtig: Sie bedeutet, dass der Klimawandel auch dann noch weitergeht, wenn die Ursache wegfällt.

3.2 Strahlungshaushalt der Erde

Die Erde erhält Energie fast ausschließlich als Strahlung von der Sonne und gibt sie als Strahlung ins Weltall ab. Weil die Sonne mit etwa 5500 °C sehr heiß ist, strahlt sie vor allem **kurzwellig** ab: sichtbares Licht, dazu nahes Infrarot und Ultraviolett. Die viel kältere Erde strahlt dagegen **langwellig** ab, im Bereich der Wärmestrahlung (Infrarot). Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Wellenlänge der abgegebenen Strahlung ist der Schlüssel zum Treibhauseffekt (Abbildung 133).

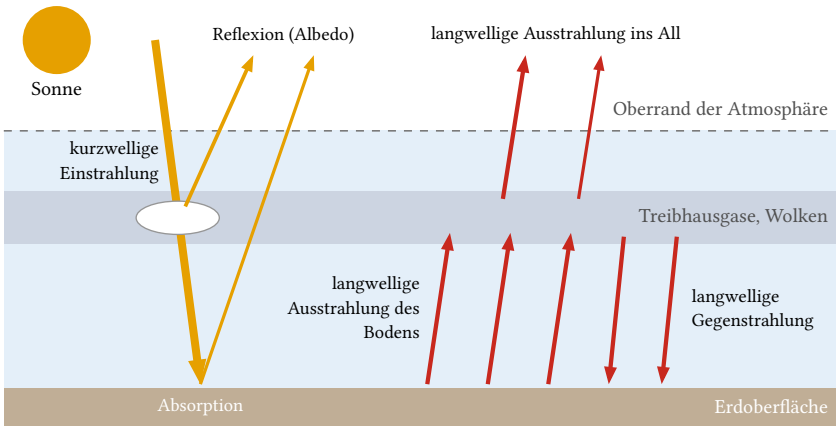


Abbildung 133: Strahlungshaushalt der Erde, nur qualitativ: Gelb kurzwellige Strahlung der Sonne, Rot langwellige Wärmestrahlung. Werte und Bilanz in P9.

Von der kurzwelligen Einstrahlung wird knapp ein Drittel sofort wieder ins All reflektiert, vor allem von Wolken, hellen Flächen und Teilchen in der Luft. Das **Rückstrahlvermögen** einer Fläche heißt **Albedo**. Frischer Schnee reflektiert bis zu 90 % der Strahlung, offenes Meer nur etwa 6 %, Wald etwa 10 bis 15 %. Der Rest wird von der Atmosphäre und vor allem vom Boden **absorbiert**, der sich dadurch erwärmt und selbst langwellig abstrahlt.

3.3 Treibhausgase und natürlicher Treibhauseffekt

Die Hauptbestandteile der Luft, Stickstoff und Sauerstoff, lassen sowohl die kurzwellige als auch die langwellige Strahlung fast ungehindert durch. Einige Spurengase dagegen sind für das Sonnenlicht durchlässig, absorbieren aber Wärmestrahlung: die **Treibhausgase**. Ihre Moleküle bestehen aus drei oder mehr Atomen und werden von Infrarotstrahlung in Schwingung versetzt.

Gas	Wirkung je kg	Verweildauer	natürliche und menschliche Quellen
Wasserdampf H_2O	–	Tage	Verdunstung; folgt der Temperatur, der Mensch steuert ihn nicht direkt
Kohlenstoffdioxid CO_2	1	Jahrhunderte bis Jahrtausende (ein Teil)	Atmung, Vulkane; Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas, Zement, Rodung
Methan CH_4	etwa 27 bis 30	etwa 12 Jahre	Feuchtgebiete; Rinderhaltung, Nassreis, Deponien, Lecks bei Gas- und Kohleförderung
Lachgas N_2O	etwa 270	etwa 110 Jahre	Böden; Stickstoffdünger, Verbrennung
Ozon O_3 (bodennah)	–	Wochen	entsteht aus Abgasen bei Sonnenschein
fluorierte Gase (F-Gase)	bis zu mehreren Zehntausend	Jahre bis Jahrtausende	nur menschlich: Kältemittel, Isoliergas in Schaltanlagen

Tabelle 20: Wichtige Treibhausgase. Wirkung je Kilogramm über 100 Jahre im Vergleich zu CO_2 (Treibhauspotenzial) und Verweildauer gerundet nach IPCC 2021.

Die Treibhausgase absorbieren den größten Teil der Wärmestrahlung, die vom Boden aufsteigt, und strahlen selbst wieder Wärmestrahlung ab, und zwar in alle Richtungen, also auch zurück zum Boden. Diese **langwellige Gegenstrahlung** erwärmt den Boden zusätzlich zur Sonne. Er wird so warm, bis er genauso viel Energie abgibt, wie er von Sonne und Atmosphäre zusammen erhält.

Merksatz

Natürlicher Treibhauseffekt: Die natürlich vorkommenden Treibhausgase (vor allem Wasserdampf und CO_2) lassen die kurzwellige Sonnenstrahlung weitgehend durch, absorbieren aber die langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche und senden einen Teil davon als Gegenstrahlung zurück. Dadurch beträgt die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche etwa $+15\,°C$ statt etwa $-18\,°C$. Ohne natürlichen Treibhauseffekt wäre die Erde weitgehend vereist.

Der Name „Treibhaus“ ist ein Bild, kein genaues Modell: In einem Gewächshaus hält das Glas vor allem die erwärmte Luft fest. In der Atmosphäre geht es allein um die Strahlung. Einige Folgerungen sind für das Verständnis des Klimawandels wichtig:

- Der natürliche Treibhauseffekt ist lebensnotwendig; problematisch ist nur seine **Verstärkung**.
- **Wasserdampf** ist das wirksamste natürliche Treibhausgas. Er ist aber keine Ursache, sondern ein **Verstärker**: Warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen (etwa 7 % je Kelvin), und zusätzlicher Wasserdampf verstärkt die Erwärmung. Zu viel Wasserdampf regnet innerhalb von Tagen ab. CO_2 dagegen bleibt zum Teil Jahrtausende in der Luft und legt das Temperaturniveau fest, auf das sich der Wasserdampf einstellt.
- Wolken wirken doppelt: Sie reflektieren Sonnenlicht (kühlend) und verstärken die Gegenstrahlung (wärmend). Tiefe, dichte Wolken kühlen eher, hohe, dünne Eiswolken wärmen eher.

3.4 Natürliche Klimaänderungen

Das Klima der Erde hat sich immer geändert. Wer den heutigen Klimawandel erklären will, muss zeigen, warum die natürlichen Ursachen dafür nicht ausreichen. Die wichtigsten natürlichen Antriebe sind:

- **Änderungen der Erdbahn (Milanković-Zyklen):** Die Form der Erdbahn, die Neigung der Erdachse und die Richtung der Achse schwanken in Zyklen von etwa 100 000, 41 000 und 23 000 Jahren. Sie verändern, wie viel Sonnenstrahlung im Sommer auf die hohen Breiten der Nordhalbkugel fällt, und haben die Eiszeiten der letzten knapp drei Millionen Jahre getaktet. Diese Änderungen laufen über Jahrtausende ab; nach der Erdbahn müsste sich die Erde zurzeit ganz langsam abkühlen.
- **Schwankungen der Sonnenaktivität:** Im elf-jährigen Sonnenfleckenzyklus schwankt die Strahlung der Sonne nur um etwa 0,1 %. Satelliten messen seit 1978 keinen Anstieg, der die Erwärmung erklären könnte.
- **Vulkanausbrüche:** Große Ausbrüche schleudern Schwefelverbindungen bis in die Stratosphäre. Die entstehenden Schwefelsäuretröpfchen reflektieren Sonnenlicht und kühlen die Erde für ein bis zwei Jahre, nach dem Ausbruch des Pinatubo (Philippinen) 1991 um etwa 0,5 K.
- **Plattentektonik und Verwitterung** verändern über Jahrmillionen die Lage der Kontinente, die Meeresströmungen und den CO_2-Gehalt der Luft.
- **Interne Schwankungen** wie El Niño und La Niña (GL3) verschieben Wärme zwischen Ozean und Atmosphäre und machen einzelne Jahre wärmer oder kühler, ändern aber das langfristige Mittel nicht.

Auf dem Höhepunkt der letzten Kaltzeit vor rund 20 000 Jahren war es weltweit nur etwa 5 bis 6 K kälter als vor der Industrialisierung. Trotzdem lagen über Skandinavien und Norddeutschland kilometerdicke Eisschilde, der Schwarzwald trug Gletscher, und der Meeresspiegel lag rund 120 m tiefer. Wenige Kelvin im globalen Mittel bedeuten also eine völlig andere Welt.

Fachbegriffe des Bildungsplans

natürlicher Treibhauseffekt Erwärmung der Erdoberfläche durch die natürlich vorhandenen Treibhausgase, die langwellige Strahlung absorbieren und als Gegenstrahlung zurücksenden; etwa +15 °C statt −18 °C.

Treibhausgas Gas, das kurzwellige Sonnenstrahlung durchlässt, langwellige Wärmestrahlung aber absorbiert und wieder abstrahlt (H_2O, CO_2, CH_4, N_2O, O_3, F-Gase).

Üben: **noctua** ↗

4 Anthropogener Klimawandel: Ursachen und Dimensionen

BP 3.5.3.2 (1) Abi 2027

Seit Beginn der Industrialisierung um 1850 bringt der Mensch zusätzliche Treibhausgase in die Atmosphäre. Damit verstärkt er den natürlichen Treibhauseffekt. Der Weltklimarat (**Intergovernmental Panel on Climate Change**, IPCC) hat in seinem sechsten Sachstandsbericht 2021 festgestellt: Es ist „eindeutig", dass der Einfluss des Menschen Atmosphäre, Ozean und Landflächen erwärmt hat. Dieses Kapitel erklärt, woher die Treibhausgase stammen, woran man den menschlichen Einfluss erkennt und in welchen Dimensionen sich der Klimawandel zeigt.

Der IPCC

Der Weltklimarat wurde 1988 von der WMO und dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen gegründet. Er forscht nicht selbst, sondern fasst in Sachstandsberichten den Stand der veröffentlichten Forschung zusammen. Der sechste Bericht (AR6) erschien in Teilen 2021 (physikalische Grundlagen), 2022 (Folgen und Anpassung; Minderung) und 2023 (Synthese). Die Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger werden Satz für Satz von den Regierungen gebilligt, die Aussagen müssen aber durch die Forschung gedeckt sein. Der IPCC gibt zu jeder Aussage an, wie sicher sie ist („sehr wahrscheinlich" heißt mindestens 90 % Wahrscheinlichkeit). Der siebte Bericht ist für 2028/29 geplant.

4.1 Der anthropogene Treibhauseffekt

Definition

Der **anthropogene Treibhauseffekt** ist die vom Menschen verursachte Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts durch zusätzliche Treibhausgase, vor allem CO_2 aus der Verbrennung fossiler Energieträger, Methan und Lachgas aus der Landwirtschaft sowie CO_2 aus der Zerstörung von Wäldern und Mooren.

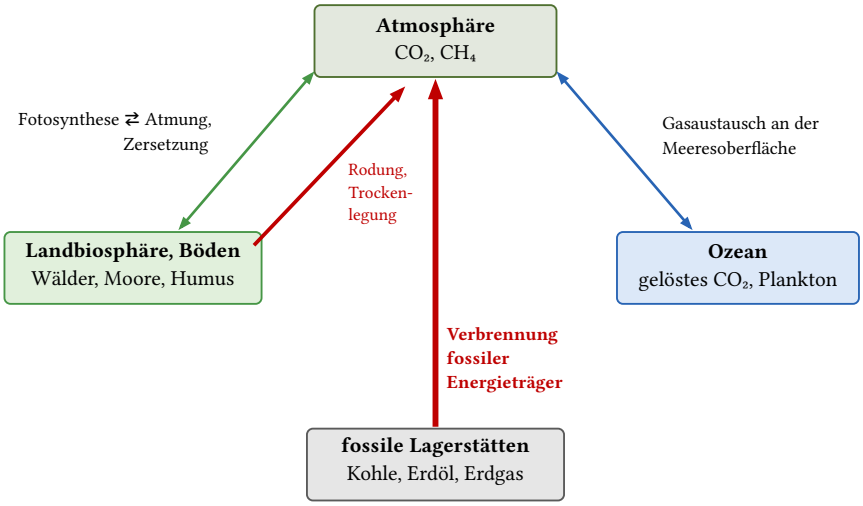
Der Mechanismus Schritt für Schritt:

a) Mehr Treibhausgase in der Atmosphäre absorbieren mehr von der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche.
b) Die Strahlung, die schließlich ins All entweicht, stammt im Mittel aus größerer Höhe. Dort ist es kälter, und kältere Luft strahlt weniger ab.
c) Die Erde gibt deshalb vorübergehend weniger Energie ab, als sie von der Sonne aufnimmt. Sie ist nicht mehr im **Strahlungsgleichgewicht**.
d) Die zusätzliche Energie erwärmt Ozean, Land, Eis und Luft, und zwar so lange, bis Ein- und Ausstrahlung wieder gleich sind, dann auf einem höheren Temperaturniveau.
e) Rückkopplungen (Wasserdampf, Eis-Albedo, Wolken) verstärken die Erwärmung etwa um das Zwei- bis Dreifache gegenüber der Wirkung des CO_2 allein.

Zurzeit nimmt die Erde mehr Energie auf, als sie abgibt. Über 90 % dieser zusätzlichen Energie steckt im Ozean (IPCC 2021). Weil Wasser eine sehr große Wärmekapazität hat, folgt die Temperatur der Luft der Zunahme der Treibhausgase nur mit Verzögerung.

4.2 Kohlenstoffkreislauf und Emissionen

Kohlenstoff wandert ständig zwischen Atmosphäre, Ozean, Landbiosphäre und Gestein (Abbildung 134). Die natürlichen Flüsse sind riesig: Pflanzen nehmen bei der Fotosynthese jedes Jahr ein Vielfaches dessen auf, was der Mensch ausstößt, geben es durch Atmung und Zersetzung aber fast vollständig wieder ab. Über Jahrtausende war der Kreislauf deshalb nahezu im Gleichgewicht, und der CO_2-Gehalt der Luft lag in den letzten 800 000 Jahren immer zwischen etwa 180 und 300 ppm. Das zeigen Luftbläschen im antarktischen Eis.



Grün und Blau: natürliche Flüsse (im Gleichgewicht), Rot: zusätzliche Flüsse durch den Menschen

Abbildung 134: Kohlenstoffkreislauf, schematisch. Der Mensch holt Kohlenstoff, der über Jahrmillionen in Lagerstätten gespeichert wurde, in wenigen Jahrhunderten in die Atmosphäre zurück.

Der Mensch greift auf zwei Wegen ein: Er verbrennt **fossile Energieträger**, deren Kohlenstoff Pflanzen und Plankton vor Jahrmillionen gebunden haben, und er zerstört natürliche Speicher durch **Rodung** von Wäldern und **Trockenlegung** von Mooren. Ozean und Landbiosphäre nehmen zusammen etwas mehr als die Hälfte der menschlichen CO_2-Emissionen wieder auf. Sie sind also **Kohlenstoffdioxid-Senken** (Kapitel 8). Der Rest reichert sich in der Atmosphäre an. Im Ozean führt das aufgenommene CO_2 zur **Versauerung**: Sein pH-Wert ist seit der vorindustriellen Zeit um etwa 0,1 gesunken.

Seit 1958 wird der CO_2-Gehalt der Luft auf dem Vulkan Mauna Loa auf Hawaii gemessen, weit weg von Städten und Industrie (Abbildung 135). Die Kurve heißt nach ihrem Begründer Charles David Keeling **Keeling-Kurve**.

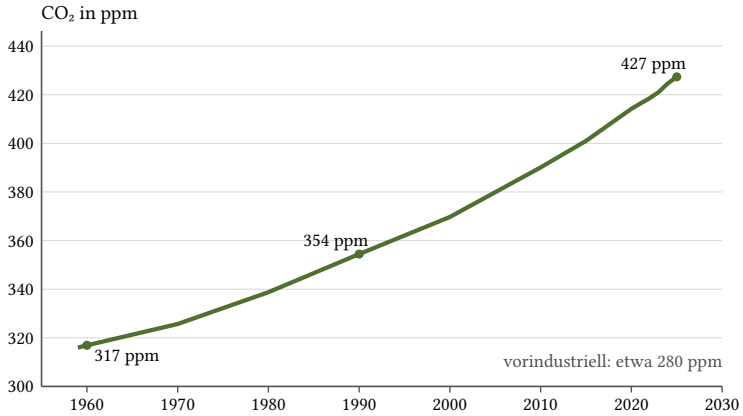


Abbildung 135: CO_2-Gehalt der Luft am Mauna Loa, Jahresmittel. Daten: NOAA Global Monitoring Laboratory, abgerufen 2026. 2025: 427,35 ppm; der Anstieg hat sich über die Jahrzehnte beschleunigt.

Der Anstieg betrug in den 1960er-Jahren knapp 1 ppm pro Jahr, seit 2015 sind es im Mittel gut 2,5 ppm pro Jahr. Der CO_2-Gehalt ist heute rund 50 % höher als vor der Industrialisierung (etwa 280 ppm) und nach dem IPCC so hoch wie seit mindestens zwei Millionen Jahren nicht mehr.

Weltweite Treibhausgasemissionen 2019 nach Gas	Anteil
CO_2 aus fossilen Energieträgern und Industrie (v. a. Zement)	64 %
Methan CH_4	18 %
CO_2 aus Landnutzung und Landnutzungsänderung (v. a. Entwaldung)	11 %
Lachgas N_2O	4 %
fluorierte Gase	2 %
insgesamt	**59 Gt CO_2-Äq.**

Tabelle 21: Weltweite Treibhausgasemissionen 2019, umgerechnet in CO_2-Äquivalente (IPCC 2022, gerundet). Nach dem Global Carbon Budget 2025 betrugen allein die fossilen CO_2-Emissionen 2025 etwa 38,1 Gt, 1,1 % mehr als 2024.

Um verschiedene Gase vergleichen zu können, rechnet man sie in **CO_2-Äquivalente** (CO_2-Äq.) um: Eine Tonne Methan zählt etwa wie 27 bis 30 Tonnen CO_2 (Tabelle 20). Nach Sektoren stammt der größte Teil der weltweiten Emissionen aus der Energieversorgung (Strom und Wärme), gefolgt von Industrie, Land- und Forstwirtschaft mit Landnutzung, Verkehr und Gebäuden.

4.3 Belege für den menschlichen Einfluss

Dass die Erde wärmer wird, ist durch Messungen gesichert. Dass der Mensch die Ursache ist, zeigen mehrere voneinander unabhängige Belege:

- **Zeitlicher Zusammenhang:** Die Erwärmung setzt mit der Industrialisierung ein und beschleunigt sich mit den Emissionen. Die natürlichen Antriebe (Sonne, Vulkane, Erdbahn) hätten im selben Zeitraum keine oder eine leicht kühlende Wirkung gehabt.
- **Herkunft des Kohlenstoffs:** Fossiler Kohlenstoff enthält kein radioaktives C-14 mehr und weniger schweres C-13 als die Luft. Genau diese Veränderung misst man im CO_2 der Atmosphäre. Gleichzeitig sinkt der Sauerstoffgehalt der Luft im selben Maß, wie es Verbrennung erwarten lässt.
- **Fingerabdrücke:** Die untere Atmosphäre (Troposphäre) erwärmt sich, die Stratosphäre darüber kühlt sich ab. Das passt zu einem verstärkten Treibhauseffekt, nicht aber zu einer stärkeren Sonne, die beide Schichten erwärmen würde. Auch erwärmen sich die Nächte stärker als die Tage und die Winter stärker als die Sommer.
- **Klimamodelle:** Modelle, die nur natürliche Antriebe enthalten, können die Erwärmung seit 1950 nicht nachbilden; mit den menschlichen Treibhausgasen gelingt es. Nach dem IPCC ist die beobachtete Erwärmung von 2010 bis 2019 nahezu vollständig vom Menschen verursacht.

Typischer Fehler
Falsch: „Der Klimawandel entsteht durch das Ozonloch."
Richtig: Das Ozonloch ist eine Ausdünnung der Ozonschicht in der Stratosphäre durch FCKW; durch sie gelangt mehr UV-Strahlung zum Boden. Mit dem Treibhauseffekt hat es nur am Rand zu tun.

Ebenso falsch: „CO_2 hält das Sonnenlicht fest." CO_2 lässt das kurzwellige Sonnenlicht durch und absorbiert die langwellige Wärmestrahlung der Erdoberfläche.

4.4 Globale Durchschnittstemperatur

Die wichtigste Kenngröße des Klimawandels ist die **globale Durchschnittstemperatur**: das Mittel der bodennahen Lufttemperatur über Land und der Wassertemperatur an der Meeresoberfläche, über die ganze Erde und ein Jahr gemittelt. Sie wird aus Zehntausenden Messstationen, Schiffen, Bojen und Satelliten berechnet. Weil sich der Absolutwert (etwa 15 °C) schwer genau bestimmen lässt, gibt man meist die **Abweichung** von einem Bezugszeitraum an, beim IPCC und im Übereinkommen von Paris vom Mittel der Jahre 1850 bis 1900 („vorindustriell").

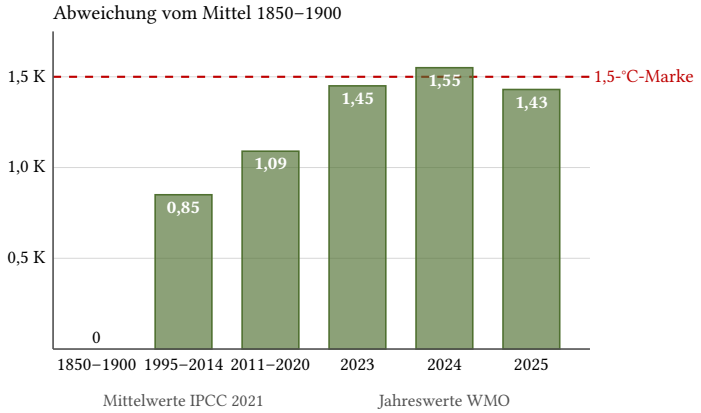


Abbildung 136: Globale Durchschnittstemperatur, Abweichung vom Mittel 1850–1900 in Kelvin. Mittelwerte nach IPCC 2021, Jahreswerte nach WMO (2024: ±0,13 K Unsicherheit). Der Copernicus-Klimadienst errechnet etwas höhere Werte (2024: 1,60 K, 2025: 1,47 K).

Abbildung 136 zeigt: Das Jahrzehnt 2011–2020 war im Mittel 1,09 K wärmer als 1850–1900, über Land 1,59 K, über dem Ozean 0,88 K. 2024 war das wärmste Jahr seit Beginn der Messungen und nach der WMO das erste Kalenderjahr mit mehr als 1,5 K Erwärmung; 2025 war das zweit- oder drittwärmste. Nach dem Copernicus-Klimadienst lag das Mittel der drei Jahre 2023 bis 2025 erstmals über 1,5 K.

Typischer Fehler

Falsch: „2024 lag über 1,5 °C, also ist das Paris-Ziel verfehlt."

Richtig: Das Ziel von Paris bezieht sich auf die langfristige Erwärmung, gemittelt über etwa 20 Jahre. Einzelne Jahre schwanken, z. B. durch El Niño, um mehrere Zehntel Kelvin.

Allerdings liegt die langfristige Erwärmung inzwischen bei etwa 1,3 bis 1,4 K. Nach dem Emissions Gap Report der Vereinten Nationen 2025 wird auch das langjährige Mittel 1,5 K sehr wahrscheinlich innerhalb des nächsten Jahrzehnts überschreiten.

4.5 Dimensionen des Klimawandels

Der Klimawandel ist mehr als eine steigende Zahl. Der Bildungsplan verlangt, seine **Dimensionen** zu erläutern. Man kann sie so ordnen:

Physische Dimension: Was ändert sich im Klimasystem?

- **Temperatur:** Erwärmung, mehr und heißere Hitzewellen, weniger Frosttage. Die Landflächen und die hohen nördlichen Breiten erwärmen sich stärker als der globale Durchschnitt; Deutschland ist nach dem Deutschen Wetterdienst seit 1881 um etwa 2,5 K wärmer geworden (Auswertung von 2025).
- **Wasserkreislauf:** Wärmere Luft nimmt mehr Wasserdampf auf, deshalb werden Starkniederschläge heftiger. Gleichzeitig verdunstet mehr, Dürren werden in vielen Regionen häufiger. Die Niederschlagsgürtel verschieben sich: Feuchte Regionen werden tendenziell feuchter, trockene Subtropen trockener.
- **Kryosphäre:** Gletscher schrumpfen weltweit, das arktische Meereis geht zurück, die Eisschilde Grönlands und der Antarktis verlieren Masse, Permafrost taut.
- **Ozean:** Erwärmung, Versauerung, Sauerstoffabnahme und Meeresspiegelanstieg. Der Meeresspiegel stieg von 1901 bis 2018 um etwa 20 cm, von 2006 bis 2018 um 3,7 mm pro Jahr, mehr als doppelt so schnell wie im 20. Jahrhundert (IPCC 2021). Ursachen sind die Ausdehnung des wärmer werdenden Wassers und das Schmelzen von Landeis.

Räumliche Dimension: Wo wirkt der Klimawandel wie? Die Folgen sind ungleich verteilt. Besonders betroffen sind Polargebiete (Erwärmung fast viermal so schnell wie im Mittel), Hochgebirge (Gletscher, Permafrost), flache Küsten und Deltas (Meeresspiegel, Sturmfluten), Trockengebiete (Dürre) und Städte (Hitzeinseln, GL6). Kapitel 6 und 7 zeigen das an zwei Raumbeispielen.

Zeitliche Dimension: Wie schnell und wie lange? Die heutige Erwärmung verläuft nach Angaben der NASA etwa zehnmal so schnell wie die Erwärmung am Ende der letzten Kaltzeit. CO_2 bleibt teilweise Jahrtausende in der Atmosphäre: Die Erwärmung, die bis zum Erreichen von netto null eingetreten ist, bleibt im Wesentlichen erhalten, und der Meeresspiegel steigt noch über Jahrhunderte weiter.

Soziale und wirtschaftliche Dimension: Wen trifft es? Nach dem IPCC (2023) leben 3,3 bis 3,6 Milliarden Menschen in Verhältnissen, die gegenüber dem Klimawandel hoch verwundbar sind. Ernteausfälle, Wasserknappheit, Hitze und Überschwemmungen gefährden Ernährung, Gesundheit, Einkommen und Wohnorte; sie können Migration und Konflikte verstärken.

Politische und ethische Dimension: Wer ist verantwortlich? Die Verursachung ist extrem ungleich verteilt (Tabelle 22). Daraus folgt die Forderung nach **Klimagerechtigkeit**: Wer mehr verursacht hat und reicher ist, soll mehr zur Minderung und zur Unterstützung der Betroffenen beitragen. Im Klimarahmen der Vereinten Nationen heißt das Prinzip „gemeinsame, aber unterschiedliche Verantwortlichkeiten".

Anteil an den historischen CO_2-Emissionen 1850–2019	Anteil
Nordamerika	23 %
Europa	16 %
Ostasien	12 %
am wenigsten entwickelte Länder (LDC, rund 14 % der Weltbevölkerung)	unter 0,4 %

Tabelle 22: Ungleiche Verantwortung: Anteile an den kumulierten Netto-CO_2-Emissionen einschließlich Landnutzung, bei den LDC nur aus fossilen Energieträgern und Industrie (Auswahl; IPCC 2022). Die LDC sind zugleich am stärksten verwundbar.

Fachbegriffe des Bildungsplans

anthropogener Treibhauseffekt vom Menschen verursachte Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts durch zusätzliche Treibhausgase, vor allem aus fossilen Energieträgern, Landwirtschaft und Entwaldung.

globale Durchschnittstemperatur über die ganze Erde (Land und Meeresoberfläche) und ein Jahr gemittelte bodennahe Temperatur, meist als Abweichung vom Mittel 1850–1900 angegeben.

Klimawandel langfristige Änderung des Klimas; heute vor allem die vom Menschen verursachte Erwärmung mit ihren Folgen für Wasserkreislauf, Eis, Ozean und Lebensräume.

Treibhausgas (siehe Kapitel 3) Gas, das langwellige Wärmestrahlung absorbiert; wichtigste anthropogene: CO_2, CH_4, N_2O.

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **CO_2-Badewanne und Restbudget** ↗

5 Klimaszenarien und Kippelemente

BP 3.5.3.2 (2)

Wie warm wird es im Jahr 2100? Diese Frage lässt sich nicht mit einer Zahl beantworten, denn die Antwort hängt vor allem davon ab, wie viele Treibhausgase die Menschheit in den nächsten Jahrzehnten noch ausstößt. Deshalb arbeitet die Klimaforschung mit Szenarien.

5.1 Klimamodelle und Szenarien

Ein **Klimamodell** ist ein Computerprogramm, das die Erde in ein dreidimensionales Gitter aus Millionen Zellen zerlegt und für jede Zelle mit physikalischen Gesetzen (Energieerhaltung, Strahlung, Strömung, Wasserkreislauf) berechnet, wie sich Temperatur, Wind, Feuchte und Niederschlag von Zeitschritt zu Zeitschritt ändern. Ob ein Modell taugt, prüft man daran, ob es das Klima der Vergangenheit wiedergibt, etwa den Jahresgang, die Erwärmung seit 1850 oder die Abkühlung nach dem Pinatubo-Ausbruch.

Was ein Modell nicht wissen kann, ist das Verhalten der Menschen. Deshalb gibt man ihm Annahmen über die künftige Entwicklung vor: Bevölkerung, Wirtschaft, Energieversorgung, Landnutzung und damit Emissionen.

Definition

Ein **Klimaszenario** ist eine in sich stimmige, plausible Beschreibung einer möglichen künftigen Entwicklung des Klimas, berechnet mit Klimamodellen auf Grundlage angenommener Emissionen. Ein Szenario ist keine Vorhersage, sondern eine „Wenn-dann-Aussage“: Wenn die Emissionen so verlaufen, dann ist mit diesem Klima zu rechnen.

Der IPCC verwendet im sechsten Sachstandsbericht die **SSP-Szenarien** (Shared Socioeconomic Pathways, „gemeinsame sozioökonomische Pfade“). Ihr Name besteht aus zwei Teilen: Die Zahl nach „SSP“ (1 bis 5) beschreibt die gesellschaftliche Entwicklung, etwa SSP1 „Nachhaltigkeit“, SSP3 „regionale Rivalität“, SSP5 „fossile Entwicklung“. Die Zahl dahinter gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb im Jahr 2100 an, eine Maßzahl für die Stärke des menschlichen Eingriffs (1.9 sehr gering bis 8.5 sehr hoch).

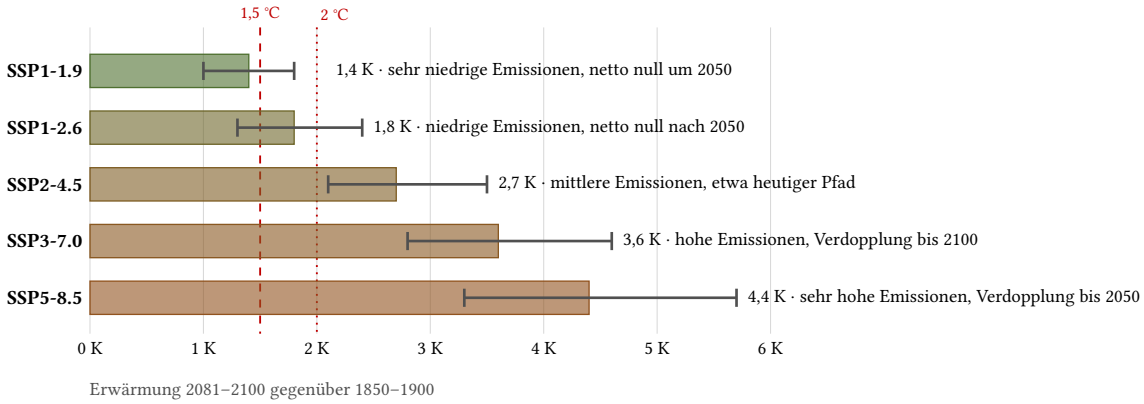


Abbildung 137: Erwärmung im Mittel der Jahre 2081–2100 gegenüber 1850–1900 in fünf Szenarien. Balken: beste Schätzung; Strich: sehr wahrscheinlicher Bereich. Daten: IPCC 2021, Tabelle SPM.1.

Szenario	Erwärmung 2081–2100	Meeresspiegelanstieg bis 2100
SSP1-1.9	1,4 K (1,0 bis 1,8)	0,28 bis 0,55 m
SSP1-2.6	1,8 K (1,3 bis 2,4)	0,32 bis 0,62 m
SSP2-4.5	2,7 K (2,1 bis 3,5)	0,44 bis 0,76 m
SSP3-7.0	3,6 K (2,8 bis 4,6)	0,55 bis 0,90 m
SSP5-8.5	4,4 K (3,3 bis 5,7)	0,63 bis 1,01 m

Tabelle 23: Szenarien des IPCC (2021): Erwärmung gegenüber 1850–1900 (beste Schätzung und sehr wahrscheinlicher Bereich) und wahrscheinlicher Meeresspiegelanstieg bis 2100 gegenüber 1995–2014. Ein Anstieg um bis zu 2 m bis 2100 und 5 m bis 2150 lässt sich in SSP5-8.5 wegen der unsicheren Eisschilde nicht ausschließen.

Was folgt aus den Szenarien?

- In allen Szenarien wird die Erwärmung bis etwa 2040 voraussichtlich 1,5 K erreichen oder überschreiten. Nur im Szenario mit sehr niedrigen Emissionen (SSP1-1.9) sinkt sie danach wieder darunter.

- Wo die Erde landet, entscheidet sich an den **kumulierten** Emissionen: Die Erwärmung wächst nahezu proportional mit der Gesamtmenge an CO_2, die seit 1850 ausgestoßen wurde. Daraus folgt die Idee des **CO_2-Budgets**: Für jedes Temperaturziel darf nur noch eine bestimmte Menge ausgestoßen werden. Nach dem Global Carbon Budget 2025 bleiben für eine 50-prozentige Chance auf 1,5 K nur noch etwa 170 Gt CO_2, das sind rund vier Jahre bei heutigen Emissionen.
- Nach dem Emissions Gap Report der Vereinten Nationen 2025 führt die derzeitige Politik der Staaten bis 2100 zu etwa 2,8 K Erwärmung, die vollständige Umsetzung aller zugesagten Klimaziele zu 2,3 bis 2,5 K. Die Welt liegt also etwa beim mittleren Szenario.
- Jedes Zehntel Grad zählt: Mit jeder zusätzlichen Erwärmung werden Extreme häufiger und intensiver. Eine Hitzewelle, die im vorindustriellen Klima einmal in 50 Jahren vorkam, tritt nach dem IPCC bei 1,5 K etwa 9-mal, bei 2 K etwa 14-mal und bei 4 K etwa 39-mal so oft auf.

Typischer Fehler
Falsch: „Die Klimamodelle sagen 2,7 °C Erwärmung voraus."
Richtig: Die Modelle berechnen für das Szenario SSP2-4.5 im Mittel 2,7 °C. Wie warm es wird, hängt davon ab, welches Szenario die Menschheit wählt.

5.2 Kippelemente

Viele Folgen des Klimawandels wachsen allmählich mit der Erwärmung. Manche Teile des Klimasystems verhalten sich aber anders: Sie bleiben lange stabil und kippen dann ab einer bestimmten Schwelle in einen neuen Zustand, oft beschleunigt durch sich selbst verstärkende Rückkopplungen. Auch wenn die Temperatur danach wieder sinkt, kehren sie nicht ohne Weiteres in den alten Zustand zurück.

Definition
Ein **Kippelement** ist ein großräumiger Teil des Erdsystems, der beim Überschreiten eines kritischen Schwellenwerts, des **Kipppunkts** (englisch **Tipping Point**, im Bildungsplan auch **Kippschalter**), durch selbstverstärkende Prozesse in einen qualitativ anderen Zustand übergeht. Der Übergang ist oft nicht oder nur über sehr lange Zeit umkehrbar.

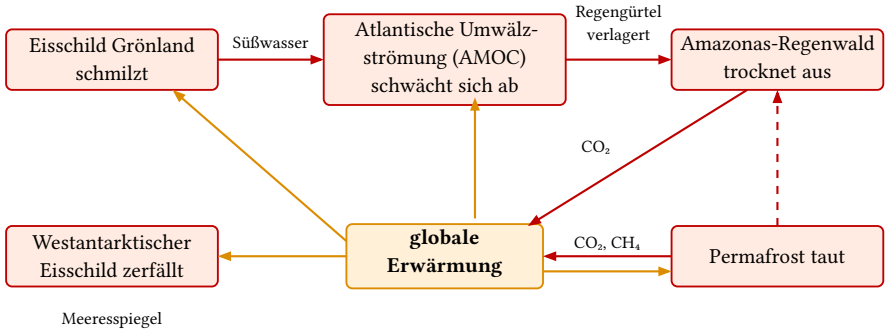
Ein anschauliches Bild ist eine Kugel in einer Mulde (ausführlich in P9): Mit zunehmender Erwärmung wird die Mulde flacher, bis die Kugel in eine andere Mulde rollt. Wichtig: Der Kipppunkt muss nicht sofort einen schnellen Wandel bedeuten. Ein Eisschild kann nach dem Überschreiten seiner Schwelle Jahrhunderte bis Jahrtausende brauchen, um zu zerfallen, aber der Zerfall ist dann nicht mehr aufzuhalten.

Kippelement	Schwelle (etwa)	Folgen beim Kippen
Warmwasser-Korallenriffe	1,2 K (1 bis 1,5)	großflächiges Absterben; Verlust von Lebensraum, Fischgründen und Küstenschutz; nach dem Global Tipping Points Report 2025 bereits überschritten
Eisschild Grönlands	1,5 K (0,8 bis 3)	über Jahrhunderte bis Jahrtausende gut 7 m Meeresspiegelanstieg
Westantarktischer Eisschild	1,5 K (1 bis 3)	über Jahrhunderte bis Jahrtausende etwa 3 m Meeresspiegelanstieg
abrupter Permafrostverlust	1,5 K (1 bis 2,3)	Freisetzung von CO_2 und Methan, weitere Erwärmung
Amazonas-Regenwald	3,5 K (2 bis 6)	Umwandlung großer Teile in Savanne, Freisetzung von CO_2, verändertes Klima Südamerikas; regional schon früher (Entwaldung, Dürre)
Atlantische Umwälzströmung (AMOC)	4 K (1,4 bis 8)	Abkühlung Nordwesteuropas, Verschiebung tropischer Regengürtel, Meeresspiegelanstieg an der US-Ostküste

Tabelle 24: Ausgewählte Kippelemente. Schwelle: Erwärmung gegenüber vorindustriell, beste Schätzung und Unsicherheitsbereich (nach Armstrong McKay u. a. 2022, Korallen nach dem Global Tipping Points Report 2025). Die Werte sind sehr unsicher.

Besonders beunruhigend ist, dass Kippelemente miteinander verbunden sind (Abbildung 138). Schmilzt das grönländische Eis, gelangt viel Süßwasser in den Nordatlantik. Süßwasser ist leichter als Salzwasser und sinkt schlechter ab; das schwächt die Atlantische Umwälzströmung, zu der der Golfstrom gehört. Eine schwächere Umwälzströmung

verschiebt die tropischen Regengürtel und könnte den Amazonas-Regenwald zusätzlich austrocknen. Ein Kippelement kann so andere anstoßen, man spricht von einer **Kippkaskade**.



Orange: Erwärmung bringt Kippelemente näher an ihre Schwelle. Rot: ein kippendes Element schiebt andere an.

Abbildung 138: Mögliche Wechselwirkungen zwischen Kippelementen (Kippkaskade), vereinfacht.

Für die Politik folgt daraus: Die Grenze von 1,5 K ist kein willkürlicher Wert. Mehrere Kippelemente haben ihre geschätzte Schwelle im Bereich zwischen 1 und 2 K. Jedes Zehntel weniger senkt das Risiko, dass sie überschritten werden.

Fachbegriffe des Bildungsplans

Klimaszenario plausible, in sich stimmige Beschreibung einer möglichen Klimazukunft auf Grundlage angenommener Emissionen; keine Vorhersage, sondern eine Wenn-dann-Aussage (z. B. SSP1-2.6).

Tipping Point (Kippschalter, Kipppunkt) kritische Schwelle, ab der ein Kippelement durch selbstverstärkende Prozesse in einen neuen, oft unumkehrbaren Zustand übergeht.

Üben: **noctua** ↗ Ausprobieren: **CO_2-Badewanne und Restbudget** ↗

6 Raumbeispiel Arktis

BP 3.5.3.2 (2)

Der Bildungsplan verlangt, die Auswirkungen des Klimawandels und die zu erwartenden Szenarien an **zwei Raumbeispielen aus unterschiedlichen Klimaregionen** darzulegen. Dieses Skript nimmt die **Arktis** als Beispiel aus der polaren Klimazone und **Bangladesch** als Beispiel aus den wechselfeuchten Tropen (Kapitel 7); als dritten, knappen Vergleich die Alpen und Baden-Württemberg. Für jedes Raumbeispiel gilt dasselbe Vorgehen: Lage und Klima, beobachtete Veränderungen, Wirkungsgefüge, Folgen für Natur und Menschen, Szenarien.

6.1 Lage und Klima

Als **Arktis** bezeichnet man meist das Gebiet nördlich des Polarkreises (66,5° N) oder, nach dem Klima, das Gebiet nördlich der 10-°C-Juli-Isotherme, die ungefähr mit der nördlichen Baumgrenze zusammenfällt. Sie umfasst das Nordpolarmeer mit seinem Meereis, Grönland mit dem zweitgrößten Eisschild der Erde und die nördlichen Ränder von Kanada, Alaska, Skandinavien und Russland mit Tundra und Permafrost. In der Arktis leben rund vier Millionen Menschen, darunter indigene Völker wie die Inuit in Kanada und Grönland, die Samen in Skandinavien und die Nenzen in Sibirien.

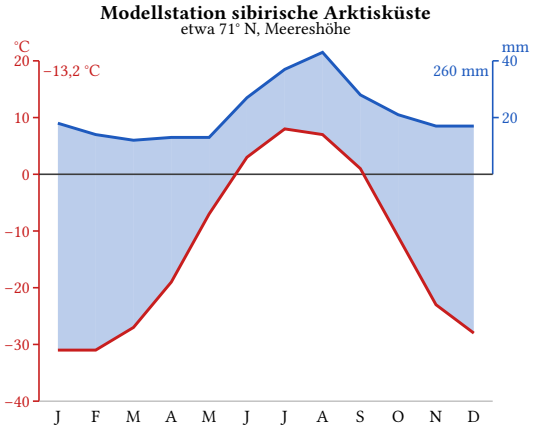


Abbildung 139: Klimadiagramm einer Modellstation an der sibirischen Arktisküste (gerundete Modellwerte, angelehnt an Stationen wie Tiksi). Lange, sehr kalte Winter, kurzer kühler Sommer, wenig Niederschlag; trotzdem humid, weil kaum etwas verdunstet.

Das Klima ist durch die Strahlung geprägt: monatelange Polarnacht im Winter, Polartag im Sommer, aber flache Sonneneinstrahlung, die zudem von Schnee und Eis großenteils reflektiert wird. Die Niederschläge sind gering, oft unter 300 mm pro Jahr, weil kalte Luft wenig Wasserdampf enthält (Abbildung 139). Im Untergrund ist der Boden ganzjährig gefroren (**Permafrost**); nur eine dünne **Auftauschicht** taut im Sommer auf.

6.2 Beobachtete Veränderungen

- **Arktische Verstärkung:** Die Arktis hat sich seit 1979 fast viermal so schnell erwärmt wie die Erde im Mittel (Rantanen u. a. 2022), in der Barentssee stellenweise bis zu siebenmal so schnell.
- **Meereis:** Die Fläche des Meereises im September, am Ende des Sommers, ist seit Beginn der Satellitenmessungen 1979 um etwa 12 % pro Jahrzehnt geschrumpft. Die 19 kleinsten Septemberflächen wurden alle in den Jahren 2007 bis 2025 gemessen; 2025 waren es 4,60 Millionen km² (NSIDC). Das Eis ist außerdem dünner und jünger geworden: Mehrjähriges, dickes Eis ist großenteils verschwunden.
- **Grönland:** Der Eisschild verliert seit den 1990er-Jahren Masse, durch Schmelzen an der Oberfläche und durch schnelleres Abfließen der Gletscher ins Meer. Würde er vollständig abschmelzen, stiege der Meeresspiegel um gut 7 m.
- **Permafrost:** Die Bodentemperaturen im Permafrost sind gestiegen, die Auftauschicht wird tiefer, die Südgrenze des Permafrosts weicht nach Norden zurück.
- **Ökosysteme:** Sträucher wachsen in die Tundra vor („Ergrünen der Arktis“), Arten aus dem Süden wandern ein, Eisbären und Walrosse verlieren ihre Jagd- und Ruheplattform auf dem Meereis.

6.3 Wirkungsgefüge: Warum gerade die Arktis?

Dass sich die Arktis so viel schneller erwärmt, liegt vor allem an zwei verstärkenden Rückkopplungen (Abbildung 140).

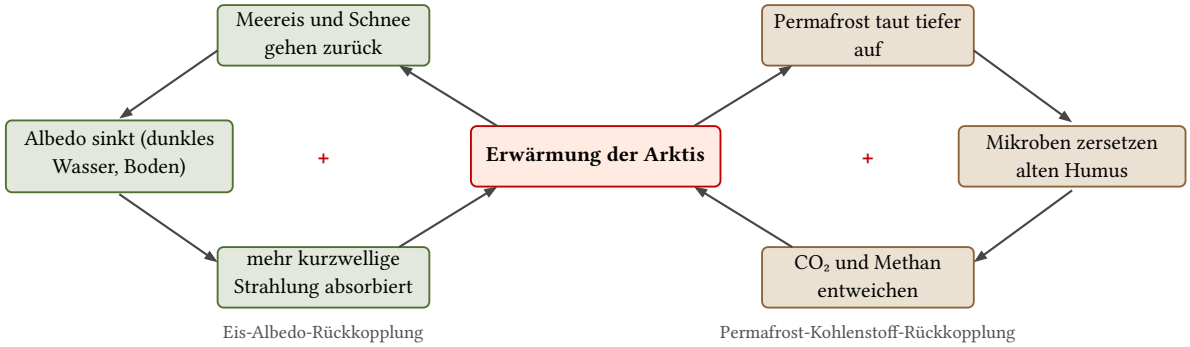


Abbildung 140: Zwei verstärkende Rückkopplungen in der Arktis.

Die **Eis-Albedo-Rückkopplung**: Helles Meereis und Schnee reflektieren den größten Teil der Sonnenstrahlung. Schmilzt das Eis, kommt dunkles Meerwasser zum Vorschein, das über 90 % der Strahlung absorbiert. Das Wasser erwärmt sich, es bildet sich im Herbst später und weniger neues Eis, und im nächsten Sommer schmilzt es noch schneller. Dazu kommen Veränderungen in der Atmosphäre: Über der Arktis ist die Luft im Winter am Boden sehr kalt und stabil geschichtet, sodass sich zusätzliche Wärme in Bodennähe staut.

Die **Permafrost-Kohlenstoff-Rückkopplung**: In den Böden der Permafrostgebiete sind Pflanzenreste aus Jahrtausenden eingefroren. Sie enthalten nach dem IPCC etwa doppelt so viel Kohlenstoff, wie heute in der Atmosphäre ist. Taut der Boden auf, zersetzen Mikroorganismen das organische Material. Unter Luftzutritt entsteht CO_2, in nassen, sauerstoffarmen Böden und Seen Methan. Beide Gase verstärken die Erwärmung, und die Erwärmung lässt mehr Permafrost tauen.

6.4 Folgen für Menschen und Raumnutzung

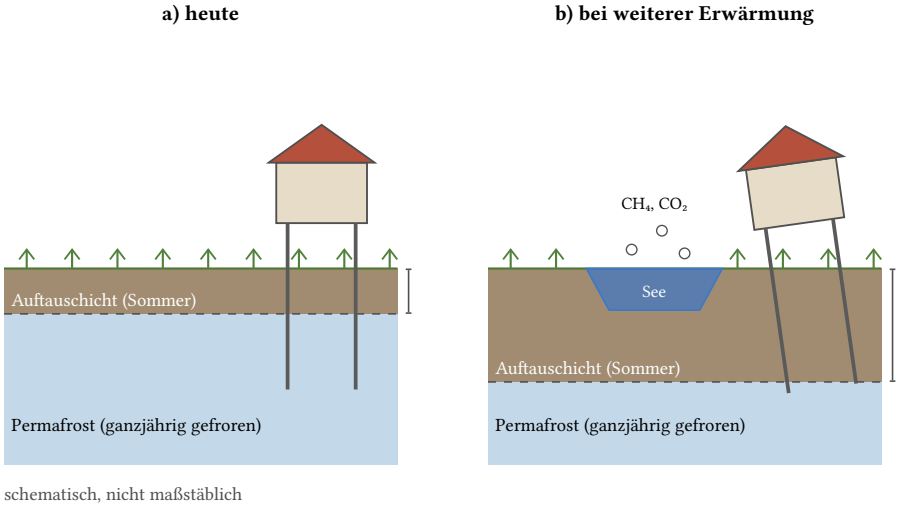


Abbildung 141: Tauender Permafrost, schematisch. Die Auftauschicht wird tiefer, im Boden gebundenes Eis schmilzt, der Boden sackt ein; es entstehen Thermokarstseen, Gebäude auf Pfählen verlieren ihren Halt.

- **Infrastruktur:** Häuser, Straßen, Pipelines und Flughäfen in Sibirien, Alaska und Kanada stehen auf gefrorenem Boden. Taut er auf, sackt der Boden ungleichmäßig ein (**Thermokarst**), Gebäude bekommen Risse, Pfähle verlieren den Halt (Abbildung 141). In Städten wie Jakutsk und Norilsk sind viele Gebäude beschädigt; 2020 lief in Norilsk aus einem Tank, dessen Fundament nachgegeben hatte, Diesel in großer Menge in Flüsse aus.
- **Küsten:** Ohne schützendes Meereis treffen Herbststürme ungebremst auf die Küsten. Aus Eis und Boden bestehende Steilküsten in Alaska und Sibirien weichen mancherorts um zehn und mehr Meter im Jahr zurück. Einige Dörfer der Inupiat und Yupik in Alaska müssen umgesiedelt werden.
- **Indigene Lebensweisen:** Jagd auf dem Meereis wird unsicherer, Wanderwege der Rentiere verändern sich, Regen im Winter überzieht den Schnee mit Eiskrusten, durch die Rentiere nicht mehr an die Flechten kommen. Traditionelles Wissen über Eis und Wetter verliert an Verlässlichkeit.

- **Neue Nutzungen und Konflikte:** Der Rückgang des Meereises öffnet im Sommer Schifffahrtswege. Der Nördliche Seeweg entlang der russischen Küste ist zwischen Nordeuropa und Ostasien um bis zu 40 % kürzer als der Weg durch den Suezkanal. Gleichzeitig werden Bodenschätze (Erdöl, Erdgas, Erze, seltene Erden) zugänglich. Die Anrainerstaaten erheben Ansprüche auf den Meeresboden; die Arktis wird geopolitisch bedeutsamer, mit Folgen für Sicherheit und Umwelt. Paradox: Die Erwärmung erleichtert die Förderung genau der fossilen Rohstoffe, die sie verursacht haben.
- **Fernwirkungen:** Das Schmelzwasser Grönlands hebt den Meeresspiegel weltweit, auch an der Nordsee. Ob die starke Erwärmung der Arktis den Jetstream welliger macht und in den mittleren Breiten zu länger anhaltenden Wetterlagen (Hitze, Dürre, Kälteeinbrüche) führt, wird in der Forschung diskutiert, ist aber nicht gesichert.

6.5 Szenarien für die Arktis

Nach dem IPCC wird die Arktis bei jeder weiteren globalen Erwärmung weiter überproportional wärmer. Ein im September praktisch eisfreies Nordpolarmeer (weniger als 1 Million km² Eis) ist nach dem Sonderbericht des IPCC über Ozean und Kryosphäre (2019) bei 1,5 K globaler Erwärmung etwa einmal in hundert Jahren zu erwarten, bei 2 K etwa in jedem dritten bis zehnten Jahr. Ein erster eisfreier September noch vor 2050 gilt in allen Szenarien als wahrscheinlich. Die Fläche des oberflächennahen Permafrosts schrumpft je nach Szenario bis 2100 erheblich. Der Eisschild Grönlands verliert in allen Szenarien weiter Masse; wird seine Schwelle überschritten (Tabelle 24), ist sein Zerfall über Jahrhunderte nicht mehr aufzuhalten.

Merksatz

Arktis: Durch Eis-Albedo- und Permafrost-Rückkopplung erwärmt sie sich fast viermal so schnell wie die Erde im Mittel. Folgen sind Meereisrückgang, tauender Permafrost mit Schäden an Infrastruktur und zusätzlichen Treibhausgasen, Küstenerosion, Bedrohung indigener Lebensweisen sowie neue Schifffahrtswege und Rohstoffkonflikte. Grönland und der Permafrost sind Kippelemente mit weltweiten Fernwirkungen.

Üben: **noctua** ↗

7 Raumbeispiel Bangladesch

BP 3.5.3.2 (2)

7.1 Lage und Klima

Bangladesch liegt im Nordosten Südasiens am Golf von Bengalen, zwischen etwa 21° und 26° nördlicher Breite. Der größte Teil des Landes ist das **Delta** von Ganges, Brahmaputra und Meghna, eines der größten Flussdeltas der Erde. Große Teile des Landes liegen nur wenige Meter über dem Meeresspiegel. Auf etwa 148 000 km² (gut zwei Fünftel der Fläche Deutschlands) leben rund 170 Millionen Menschen; Bangladesch ist damit einer der am dichtesten besiedelten Flächenstaaten der Erde.

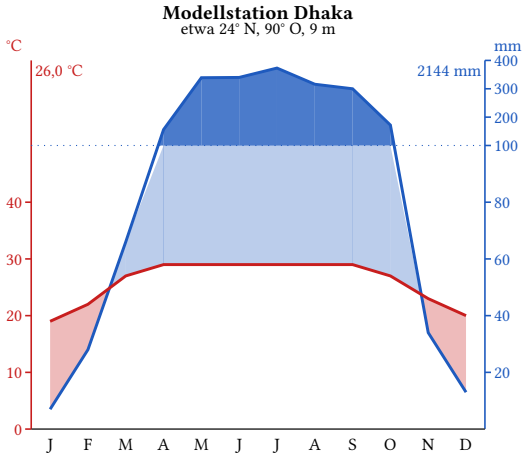
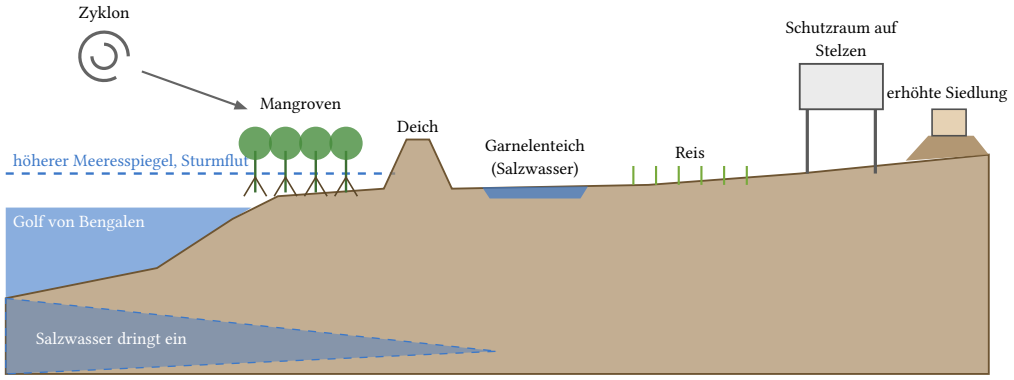


Abbildung 142: Klimadiagramm einer Modellstation für Dhaka (gerundete Richtwerte, Modellstation). Feuchtheißer Sommermonsun, trockene Monate im Winter. Über 100 mm Monatsniederschlag (dunkelblau) ist der Maßstab auf ein Zehntel verkürzt.

Das Klima ist tropisch-wechselfeucht und vom **Monsun** bestimmt (Abbildung 142, GL3). Von Juni bis September bringt der Südwestmonsun feuchte Luft vom Golf von Bengalen; über 80 % des Jahresniederschlags fallen zwischen Mai und Oktober. Im Winter weht trockene Luft vom Kontinent. Die Flüsse führen im Sommer gewaltige Wassermengen aus dem Himalaya, verstärkt durch die Schnee- und Gletscherschmelze. Überschwemmungen sind deshalb ein normaler Teil des Jahresablaufs: Sie bringen fruchtbaren Schlamm und ermöglichen den Reisanbau, der die Ernährung des Landes trägt. Vor und nach dem Monsun (April bis Mai und Oktober bis November) ziehen **tropische Wirbelstürme** (Zyklone) aus dem Golf von Bengalen auf die Küste; der trichterförmige Golf und die flache Küste lassen Sturmfluten besonders hoch auflaufen.

7.2 Klimafolgen im Delta



schematisch, Höhen stark überhöht; Südwesten Bangladeschs, rund 100 km vom Meer bis zur erhöhten Siedlung

Abbildung 143: Profil durch den Küstenraum im Südwesten Bangladeschs (schematisch): Mangroven, Deich, Polder mit Garnelenteich und Reisfeldern, Zyklonschutzraum und erhöhte Siedlung; gestrichelt ein höherer Meeresspiegel und der Salzwasserkeil im Grundwasser.

- **Meeresspiegelanstieg und Sturmfluten:** Etwa ein Drittel der Landesfläche gehört zur Küstenzone, in der gut ein Viertel der Bevölkerung lebt. Weil das Delta zusätzlich durch Sedimentverdichtung und Grundwasserentnahme absinkt, steigt der Meeresspiegel relativ zum Land schneller als im globalen Mittel. Studien schätzen, dass ein Meter Anstieg je nach Annahmen über Deiche etwa 8 bis 17 % der Landesfläche überfluten könnte. Höhere Meeresspiegel lassen jede Sturmflut höher und weiter landeinwärts auflaufen.
- **Versalzung:** Salzwasser dringt bei Sturmfluten über die Deiche, in der Trockenzeit weit die Flussarme hinauf und als **Salzwasserkeil** ins Grundwasser vor (Abbildung 143). Trinkwasser wird knapp, und Reis verträgt nur wenig Salz. Viele Bauern im Südwesten sind deshalb vom Reisanbau zur Garnelenzucht in Salzwasserteichen übergegangen. Das bringt Exporterlöse, versalzt aber die Böden weiter, braucht weniger Arbeitskräfte und verdrängt Kleinbauern.
- **Zyklone:** Wärmeres Meerwasser liefert mehr Energie. Nach dem IPCC nimmt der Anteil sehr starker tropischer Wirbelstürme mit der Erwärmung zu, ihre Niederschläge werden heftiger.
- **Flusshochwasser und Erosion:** Stärkere Monsunniederschläge und, für einige Jahrzehnte, mehr Gletscherschmelze im Himalaya erhöhen die Hochwassergefahr. Die Flüsse verlagern ihre Läufe; jedes Jahr verlieren Zehntausende Menschen durch Ufererosion Land und Haus.
- **Hitze:** Feuchtheiße Hitzeperioden gefährden die Gesundheit, besonders in den dicht bebauten Elendsvierteln von Dhaka und für Menschen, die im Freien arbeiten.
- **Migration:** Wer sein Land verliert, zieht meist in die Städte, vor allem nach Dhaka, das um mehrere Hunderttausend Menschen im Jahr wächst. Klimawandel ist dabei selten der einzige, aber oft ein verstärkender Grund (GL6, GL7).

7.3 Verwundbarkeit und Anpassung

Bangladesch hat kaum zum Klimawandel beigetragen: Der Ausstoß pro Kopf liegt bei einem kleinen Bruchteil des deutschen. Das Land ist aber eines der verwundbarsten der Erde. Gleichzeitig ist es ein Beispiel dafür, dass Anpassung Leben rettet:

- Der Zyklon von 1970 (Bhola) tötete schätzungsweise 300 000 bis 500 000 Menschen, einer der schwersten Wirbelsturmkatastrophen der Geschichte. Seitdem hat Bangladesch ein Frühwarnsystem mit Zehntausenden freiwilligen Helfern aufgebaut, die Warnungen bis in die Dörfer tragen, und Tausende **Zyklonschutzräume** auf Stelzen gebaut, die außerhalb der Sturmzeit als Schulen dienen. Beim Zyklon Sidr 2007 starben noch einige Tausend Menschen, beim ebenfalls schweren Zyklon Amphan 2020 in Bangladesch einige Dutzend, obwohl über zwei Millionen Menschen evakuiert werden mussten.
- **Deiche und Polder** schützen große Teile der Küste; die **Mangrovenwälder** der Sundarbans (UNESCO-Welterbe, das größte Mangrovengebiet der Erde) bremsen Sturmfluten.
- Die Landwirtschaft passt sich an: **salztolerante Reissorten**, Anbau auf erhöhten Beeten, **schwimmende Gärten** aus Wasserhyazinthen, die sich mit dem Hochwasser heben, Häuser auf aufgeschütteten Hügeln.
- Der **Deltaplan 2100** der Regierung (2018) nach niederländischem Vorbild plant Hochwasserschutz, Wasser- und Landnutzung für das ganze Jahrhundert.

Kleine Inselstaaten: wenn Anpassung an Grenzen stößt

Noch verwundbarer sind flache Atollstaaten im Pazifik und Indischen Ozean, etwa Tuvalu, Kiribati oder die Malediven, deren Land meist nur wenige Meter über dem Meer liegt. Tuvalu hat 2023 mit Australien die **Falepili-Union** geschlossen: Seit 2025 können jedes Jahr bis zu 280 Bürger Tuvalus ein dauerhaftes Aufenthaltsrecht in Australien erhalten. Bei der ersten Auslosung 2025 meldete sich ein großer Teil der rund 10 000 Einwohner an. Hier zeigt sich eine Grenze der Anpassung: geplante Umsiedlung als letzte Möglichkeit.

7.4 Szenarien und Vergleich

Für Bangladesch ist der weitere Anstieg des Meeresspiegels die größte langfristige Gefahr. Bis 2100 sind je nach Szenario global etwa 0,3 bis 1 m zu erwarten (Tabelle 23), relativ zum absinkenden Delta mehr. Da der Meeresspiegel auch nach dem Ende der Emissionen über Jahrhunderte weiter steigt, entscheidet sich langfristig an den Emissionen dieses Jahrhunderts, ob große Teile des Deltas bewohnbar bleiben. Bei den Niederschlägen erwarten die Modelle einen stärkeren Sommermonsun mit heftigeren Einzelereignissen.

Kriterium	Arktis	Bangladesch
Klimazone	polar: kalt, trocken, Polartag und Polarnacht	tropisch-wechselfeucht, Monsun
wichtigste Klimafolgen	Meereisrückgang, Permafrost taut, Eisschild Grönland schmilzt	Meeresspiegel, Sturmfluten, Versalzung, Hochwasser, Hitze
Rückkopplung auf das Weltklima	stark (Albedo, Methan, CO_2); Kippelemente	gering
Fernwirkungen	Meeresspiegel weltweit, evtl. Jetstream	Migration, Ernährungssicherheit
Betroffene	wenige Millionen, darunter Indigene	rund 170 Millionen, viele arm
Chancen	Schifffahrt, Rohstoffe (umstritten)	kaum
Anpassung	Infrastruktur umbauen, Umsiedlung	Frühwarnung, Schutzräume, Deiche, salztolerante Sorten

Tabelle 25: Vergleich der beiden Raumbeispiele.

7.5 Zum Vergleich: Alpen und Baden-Württemberg

Ein drittes, nahes Beispiel aus den mittleren Breiten zeigt, dass der Klimawandel auch hier spürbar ist.

- **Alpen:** Die Alpen erwärmen sich etwa doppelt so schnell wie der globale Durchschnitt. Die Gletscher der Schweiz haben nach dem Schweizer Gletschermessnetz GLAMOS seit 2015 rund ein Viertel ihres Volumens verloren, 2025 allein etwa 3 %; seit den 1970er-Jahren sind über 1 100 Schweizer Gletscher ganz verschwunden. Tauender Permafrost in den Felswänden macht Bergstürze häufiger, wie 2025 beim Gletscher- und Felssturz, der das Walliser Dorf Blatten verschüttete. Die Schneesicherheit niedriger Skigebiete schwindet; der Abfluss der Flüsse verlagert sich vom Sommer in den Winter und Frühling (GL3, Hochgebirge).
- **Baden-Württemberg:** Hitzetage nehmen zu, besonders im Oberrheingraben, einer der wärmsten Regionen Deutschlands. Trockene Sommer setzen den Wäldern zu (Fichten im Schwarzwald, Borkenkäfer), Starkregen wie 2016 in Braunsbach zeigen die Gefahr plötzlicher Sturzfluten. Am Feldberg im Schwarzwald wird die Schneedecke im Winter kürzer. Gleichzeitig werden Weinbau und Landwirtschaft nach Norden und in höhere Lagen verschoben.

Fachbegriffe des Bildungsplans

Klimaszenario (siehe Kapitel 5) mögliche Klimazukunft unter angenommenen Emissionen; für Bangladesch vor allem Meeresspiegel- und Monsunszenarien.

Tipping Point (Kippschalter) (siehe Kapitel 5) in der Arktis z. B. Meereis, Permafrost und Grönland-Eisschild.

Üben: **noctua** ↗

8 Klimaschutz: Ziele und Maßnahmen

BP 3.5.3.2 (3) Abi 2027

Gegen den Klimawandel gibt es zwei grundsätzliche Strategien. **Klimaschutz** (**Mitigation**, Minderung) bekämpft die Ursache: Er verringert die Emissionen von Treibhausgasen oder entzieht der Atmosphäre CO_2. **Anpassung** (**Adaptation**, Kapitel 9) begrenzt die Schäden der Erwärmung, die sich nicht mehr verhindern lässt. Beide sind nötig: Ohne Klimaschutz würde Anpassung irgendwann unbezahlbar oder unmöglich, ohne Anpassung kämen schon die heute unvermeidbaren Folgen viele Menschen teuer zu stehen.

Der Bildungsplan verlangt, aktuelle Maßnahmen **auf unterschiedlichen Maßstabsebenen** zu bewerten (Abbildung 144): global, europäisch, national, regional, kommunal und individuell.

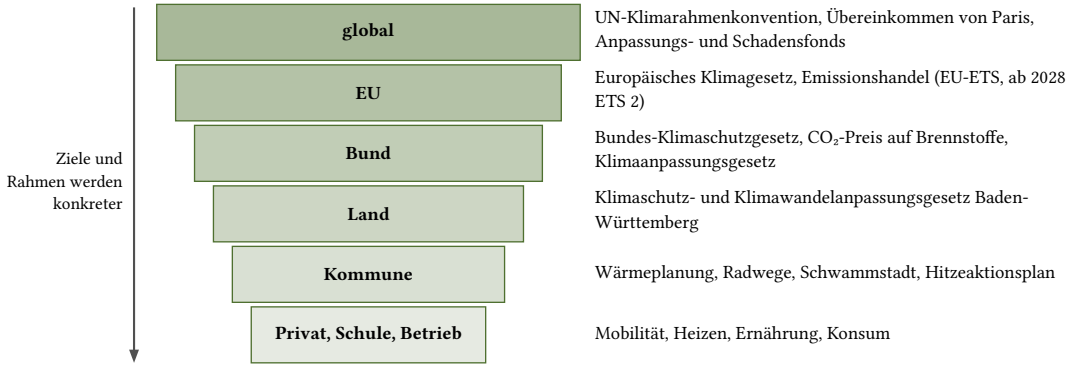


Abbildung 144: Maßstabsebenen von Klimaschutz und Anpassung mit Beispielen.

8.1 Globale Ebene: vom Rio-Gipfel zum Übereinkommen von Paris

- **1992, Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC):** Ziel ist, „eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems zu verhindern". Seit 1995 treffen sich die Vertragsstaaten jährlich zur **Klimakonferenz** (COP, Conference of the Parties).
- **1997, Kyoto-Protokoll:** Erstmals verbindliche Minderungspflichten, aber nur für Industrieländer. Die USA traten nie bei, große Schwellenländer wie China und Indien hatten keine Pflichten.
- **2015, Übereinkommen von Paris:** Fast alle Staaten der Erde verpflichten sich, die Erwärmung auf „deutlich unter 2 °C" gegenüber vorindustriell zu begrenzen und „Anstrengungen zu unternehmen", sie auf 1,5 °C zu begrenzen. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts soll ein Gleichgewicht zwischen Emissionen und Senken erreicht werden, also netto null.

Definition

Ein **Klimaziel** ist eine politisch festgelegte Zielmarke im Klimaschutz: entweder eine Temperaturgrenze (Paris: deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C) oder eine Minderung der Emissionen bis zu einem Zieljahr gegenüber einem Bezugsjahr (z. B. Deutschland: −65 % bis 2030 gegenüber 1990) oder ein Zeitpunkt für Netto-Treibhausgasneutralität.

Das Besondere am Pariser Abkommen ist sein Aufbau „von unten": Jeder Staat legt selbst fest, was er beiträgt (**national festgelegte Beiträge**, NDCs), und muss alle fünf Jahre einen neuen, ehrgeizigeren Beitrag vorlegen. Alle fünf Jahre wird in einer **globalen Bestandsaufnahme** geprüft, ob die Summe reicht; die erste auf der Klimakonferenz in Dubai 2023 rief zur „Abkehr von fossilen Brennstoffen" in den Energiesystemen auf. Sanktionen gibt es nicht; das Abkommen setzt auf Transparenz und öffentlichen Druck. Die USA, nach China der zweitgrößte Emittent, sind zum 27. Januar 2026 zum zweiten Mal aus dem Abkommen ausgetreten.

Bewertung: Paris hat erreicht, was Kyoto nicht gelang, nämlich alle großen Emittenten einzubinden, und die erwartete Erwärmung ist seit 2015 gesunken (von über 3,5 K auf etwa 2,8 K bei derzeitiger Politik). Die Summe der Zusagen reicht aber nicht für 1,5 °C: Dafür müssten die weltweiten Emissionen bis 2030 um 43 % und bis 2035 um etwa 55 % gegenüber 2019 sinken (IPCC 2023, UNEP 2025), tatsächlich steigen sie noch leicht.

8.2 Europäische Ebene

Die Europäische Union hat ihre Ziele im **Europäischen Klimagesetz** (2021) verbindlich festgelegt: netto mindestens −55 % Treibhausgase bis 2030 gegenüber 1990 und Klimaneutralität bis 2050. 2026 kam das Zwischenziel von −90 % bis

2040 hinzu; ab 2036 dürfen dafür bis zu 5 Prozentpunkte durch Klimaschutzprojekte außerhalb der EU erbracht werden. Kritiker halten das für eine Abschwächung, weil Geld für Gutschriften im Ausland nicht in den Umbau der eigenen Wirtschaft fließt.

Wichtigstes Instrument ist der **Emissionshandel** (EU-ETS, seit 2005) für Kraftwerke, Industrie und innereuropäischen Luftverkehr: Die EU legt eine Obergrenze (Cap) für die Emissionen fest, die jedes Jahr sinkt, und gibt entsprechend viele Zertifikate aus. Wer CO_2 ausstößt, muss Zertifikate abgeben; wer weniger braucht, kann sie verkaufen (Trade). So entsteht ein Preis, und Emissionen werden dort gemindert, wo es am billigsten ist. Ein zweiter Emissionshandel (ETS 2) für Gebäude und Straßenverkehr soll 2028 beginnen.

8.3 Nationale Ebene: Deutschland

Das **Bundes-Klimaschutzgesetz** (KSG) legt in der Fassung vom Juli 2024 fest:

- −65 % Treibhausgase bis 2030 und −88 % bis 2040, jeweils gegenüber 1990;
- **Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045**; nach 2050 sollen die Emissionen negativ sein, Deutschland soll der Atmosphäre also mehr Treibhausgase entziehen, als es ausstößt;
- zulässige Jahresemissionsmengen bis 2030; die Einhaltung wird seit 2024 über alle Sektoren gemeinsam und mehrjährig geprüft, ein unabhängiger **Expertenrat für Klimafragen** bewertet die Daten.

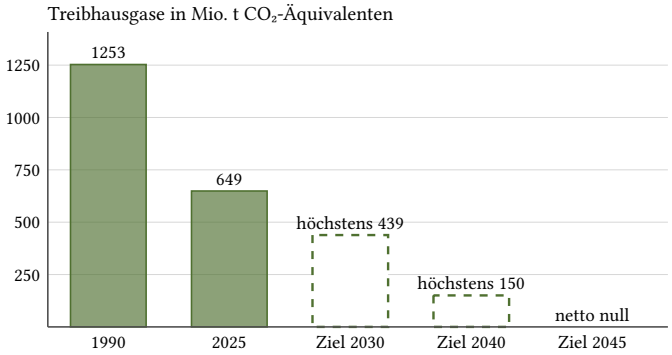


Abbildung 145: Treibhausgasemissionen Deutschlands und Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Daten: Umweltbundesamt (14.03.2026), 2025 vorläufig; Ziele nach § 3 KSG (Fassung vom 15.07.2024) aus den Prozentzielen berechnet.

2025 stieß Deutschland nach dem Umweltbundesamt 649 Millionen t CO_2-Äquivalente aus, 48,2 % weniger als 1990 (Abbildung 145). Die größten Sektoren waren die Energiewirtschaft (189 Mio. t), der Verkehr (146 Mio. t), die Industrie (144 Mio. t) und die Gebäude (103 Mio. t); Landwirtschaft und Abfall zusammen kamen auf etwa 66 Mio. t. Der Rückgang seit 1990 stammt vor allem aus der Stromerzeugung (Kohleausstieg, Ausbau von Wind- und Solarenergie) und aus dem Zusammenbruch der Industrie in Ostdeutschland nach 1990; im Verkehr sind die Emissionen kaum gesunken. Zwischen 2025 und 2030 müssen die Emissionen um ein weiteres Drittel sinken, also deutlich schneller als bisher.

Wichtige Instrumente auf Bundesebene sind der **CO_2-Preis** auf Heizöl, Erdgas, Benzin und Diesel (nationaler Brennstoffemissionshandel, 2026 zwischen 55 und 65 € je Tonne), die Förderung erneuerbarer Energien, Vorgaben für Heizungen in Gebäuden, der Ausstieg aus der Kohleverstromung bis spätestens 2038 und Förderprogramme für die Industrie (z. B. für Stahl mit Wasserstoff statt Koks).

8.4 Regionale und kommunale Ebene: Baden-Württemberg und Gemeinden

Baden-Württemberg ist ehrgeiziger als der Bund: Nach dem **Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz** (KlimaG BW, 2023) sollen die Emissionen bis 2030 um mindestens 65 % gegenüber 1990 sinken und das Land bis **2040** netto treibhausgasneutral sein, fünf Jahre vor dem Bund. Das Gesetz schreibt unter anderem eine Pflicht zu Photovoltaik auf neuen Gebäuden und großen Parkplätzen vor und verlangt, mindestens 2 % der Landesfläche für Windenergie und Freiflächen-Photovoltaik auszuweisen. Die Stadtkreise und Großen Kreisstädte, also auch Lörrach, mussten bis Ende 2023 eine **kommunale Wärmeplanung** vorlegen; die gemeinsame Wärmeplanung im Landkreis Lörrach zielt auf eine klimaneutrale Wärmeversorgung bis 2040.

Kommunen sind wichtige Akteure, weil sie über Bauleitplanung, Verkehr, Stadtwerke, eigene Gebäude und Beratung viele Emissionen beeinflussen: Fernwärme aus erneuerbaren Quellen, Radwege und Nahverkehr, Energiestandards in Neubaugebieten, Sanierung von Schulen, Bürgerenergiegenossenschaften.

8.5 Reduktion der Treibhausgase: Handlungsfelder

Die **Reduktion der Treibhausgase** ist der Kern des Klimaschutzes. Sie setzt in allen Sektoren an:

- **Energie:** Kohle, Öl und Gas durch Wind, Sonne, Wasserkraft und Biomasse ersetzen; Stromnetze und Speicher ausbauen.
- **Effizienz und Suffizienz:** weniger Energie für dieselbe Leistung (Wärmedämmung, Wärmepumpe, LED) und bewusster Verzicht auf unnötigen Verbrauch.
- **Verkehr:** Verlagerung auf Bahn, Bus, Rad und Fuß; Elektromobilität; kürzere Wege durch Stadtplanung.
- **Industrie:** Prozesse elektrifizieren, Wasserstoff aus erneuerbarem Strom, Kreislaufwirtschaft; schwer vermeidbare Emissionen etwa aus der Zementherstellung abscheiden.
- **Landwirtschaft und Ernährung:** weniger Methan aus der Tierhaltung, weniger Stickstoffdünger, weniger Lebensmittelverschwendung, mehr pflanzliche Ernährung.
- **Wälder und Moore:** Entwaldung stoppen, Moore wiedervernässen.

8.6 Kohlenstoffdioxid-Senken

Definition

Eine **Kohlenstoffdioxid-Senke** (CO_2-Senke) ist ein Speicher, der der Atmosphäre mehr CO_2 entzieht, als er abgibt. Natürliche Senken sind Ozean, wachsende Wälder, Moore und humusreiche Böden; technische Senken entnehmen CO_2 gezielt und speichern es dauerhaft.

Ozean und Landbiosphäre nehmen heute zusammen etwas mehr als die Hälfte der menschlichen CO_2-Emissionen auf. Ihre Leistung ist aber nicht garantiert: Wärmeres Wasser löst weniger CO_2, Dürren und Waldbrände können Wälder von Senken zu Quellen machen. Der deutsche Wald war wegen Dürre, Borkenkäfern und Holzeinschlag nach der Bundeswaldinventur von 2022 schon keine Senke mehr. Entwässerte Moore sind eine starke Quelle: Sie machen in Deutschland nur wenige Prozent der Fläche aus, verursachen aber einen erheblichen Teil der Emissionen aus der Landwirtschaft. Wiedervernässte Moore halten den Kohlenstoff im Boden.

Weil sich nicht alle Emissionen vermeiden lassen (Zement, Teile der Landwirtschaft, Luftfahrt), enthalten alle Szenarien, die 1,5 oder 2 °C einhalten, auch die **Entnahme von CO_2** aus der Atmosphäre (**Carbon Dioxide Removal**, CDR). „Netto null“ heißt: Die verbleibenden Emissionen werden durch Senken ausgeglichen.

8.7 Geo-Engineering

Definition

Geo-Engineering (Climate Engineering) bezeichnet absichtliche, großräumige technische Eingriffe in das Klimasystem, um den Klimawandel oder seine Folgen abzuschwächen. Man unterscheidet die **CO_2-Entnahme** aus der Atmosphäre (CDR) und das **Strahlungsmanagement** (Solar Radiation Management, SRM), das die Sonneneinstrahlung verringert.

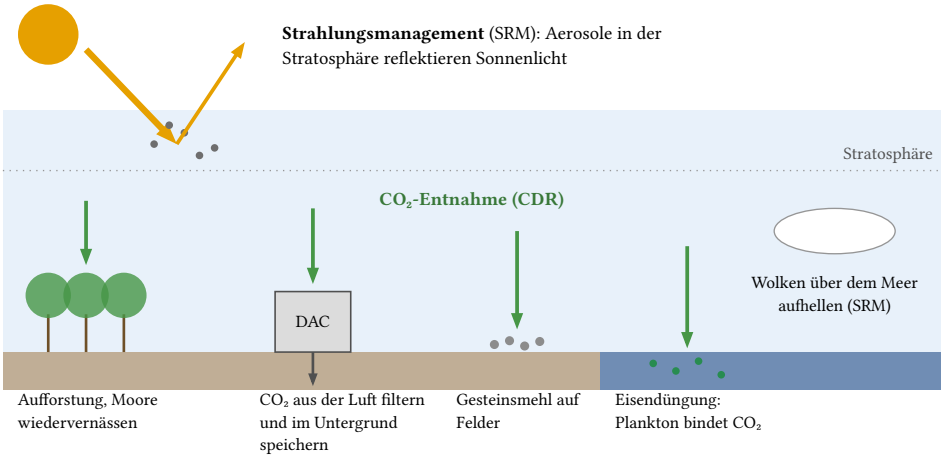


Abbildung 146: Ansatzpunkte des Geo-Engineering, schematisch: Strahlungsmanagement greift bei der kurzwelligen Einstrahlung an, CO_2-Entnahme beim Kohlenstoffkreislauf.

Verfahren	Chancen	Risiken und Grenzen
CO_2-Entnahme (CDR): setzt an der Ursache an, wirkt langsam		
Aufforstung, Wiedervernässung von Mooren	billig, erprobt, fördert Artenvielfalt und Wasserhaushalt	braucht viel Fläche (Konkurrenz zu Nahrungsmitteln), Speicher unsicher (Brand, Dürre)
Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung (BECCS)	liefert Energie und entzieht CO_2	riesiger Flächenbedarf, Speicherstätten nötig
direkte Abscheidung aus der Luft (DAC) mit Speicherung im Untergrund	kaum Fläche, gut messbar, dauerhaft	sehr hoher Energiebedarf und hohe Kosten, bisher winzige Mengen
beschleunigte Verwitterung (Gesteinsmehl auf Felder)	verbessert zugleich Böden	Abbau und Transport großer Gesteinsmengen, Wirkung schwer messbar
Eisendüngung des Ozeans	regt Plankton an, das CO_2 bindet	unklare Wirkung, Störung mariner Ökosysteme; international stark eingeschränkt
Strahlungsmanagement (SRM): bekämpft nur das Symptom, wirkt schnell		
Schwefelaerosole in der Stratosphäre	vergleichsweise billig, kühlt innerhalb eines Jahres (Vorbild Vulkanausbrüche)	Versauerung der Meere geht weiter; regionale Niederschläge verändern sich, Ozonschicht gefährdet; bei Abbruch schlagartige Erwärmung („Terminationsschock“); wer entscheidet über das Weltklima?
Aufhellen von Wolken über dem Meer	regional einsetzbar	Wirkung auf Niederschläge unklar

Tabelle 26: Verfahren des Geo-Engineering mit Chancen und Risiken (Auswahl).

Bewertung: CO_2-Entnahme ist nach allen Szenarien des IPCC nötig, um schwer vermeidbare Restemissionen auszugleichen; sie darf aber nicht als Ausrede dienen, die Reduktion aufzuschieben (**moralisches Risiko**, englisch moral hazard). Strahlungsmanagement ist hoch umstritten: Es könnte im Notfall die Temperatur schnell senken, verändert aber das Klima regional unvorhersehbar und müsste über Jahrhunderte fortgesetzt werden. Es gibt keine internationale Regelung, wer darüber entscheiden dürfte.

Merksatz

Klimaschutz verringert die Ursache des Klimawandels: Reduktion der Treibhausgase in allen Sektoren, Erhalt und Ausbau von CO_2-Senken, ergänzend technische CO_2-Entnahme. Er wird auf allen Maßstabsebenen betrieben, von den Klimazielen von Paris über EU, Bund und Land bis zur Gemeinde. Bewertet werden Maßnahmen nach Wirksamkeit, Kosten, Nebenwirkungen, sozialer Gerechtigkeit und Durchsetzbarkeit.

Fachbegriffe des Bildungsplans

Geo-Engineering absichtlicher großräumiger technischer Eingriff ins Klimasystem, entweder CO_2-Entnahme (CDR) oder Strahlungsmanagement (SRM).

Klimaschutz alle Maßnahmen, die die Ursache des Klimawandels bekämpfen, also Treibhausgasemissionen mindern oder CO_2 aus der Atmosphäre entnehmen (Mitigation).

Klimaziel politisch festgelegte Zielmarke (Temperaturgrenze, Minderung bis zu einem Zieljahr oder Zeitpunkt der Treibhausgasneutralität).

Kohlenstoffdioxid-Senke Speicher, der der Atmosphäre mehr CO_2 entzieht, als er abgibt (Ozean, Wald, Moor, Boden, technische Speicher).

Reduktion der Treibhausgase Verringerung der Emissionen, z. B. durch erneuerbare Energien, Effizienz, Verkehrswende, veränderte Landwirtschaft.

Üben: **noctua** ↗

9 Anpassung an den Klimawandel

BP 3.5.3.2 (3) Abi 2027

Selbst wenn alle Emissionen morgen enden würden, ginge der Meeresspiegelanstieg weiter, und die bereits eingetretene Erwärmung bliebe. Deshalb gehört zu jeder Klimapolitik auch die Anpassung.

Definition

Eine **Anpassungsstrategie** ist ein geplantes Bündel von Maßnahmen, mit dem ein Raum, eine Gesellschaft oder ein Wirtschaftszweig sich auf die heutigen und erwarteten Folgen des Klimawandels einstellt, um Schäden zu verringern und mögliche Chancen zu nutzen (Adaptation).

9.1 Verwundbarkeit

Wie stark ein Raum unter dem Klimawandel leidet, hängt nicht nur vom Klima ab. Der IPCC beschreibt das **Risiko** als Zusammenspiel von Gefahr, Exposition und **Vulnerabilität** (Verwundbarkeit), die sich wiederum aus Empfindlichkeit und Anpassungsfähigkeit ergibt (Abbildung 147).

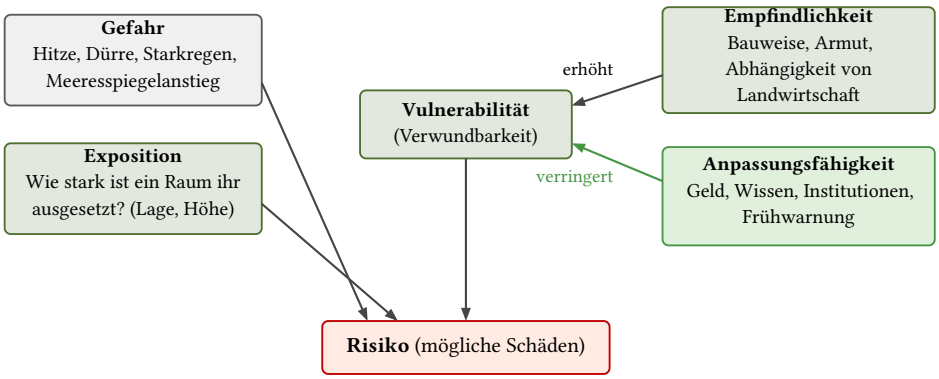


Abbildung 147: Vereinfachtes Schema nach den Begriffen des IPCC: Das Risiko ergibt sich aus Gefahr, Exposition und Vulnerabilität. Die Vulnerabilität wächst mit der Empfindlichkeit und sinkt mit der Anpassungsfähigkeit (ebenso in GL1 für Naturgefahren und in GL6 für die Stadt).

Der Vergleich zwischen den Niederlanden und Bangladesch macht das deutlich: Beide liegen in großen Teilen tief, sind also ähnlich **exponiert**. Die Niederlande sind aber reich, haben Deiche für extrem seltene Sturmfluten, ein funktionierendes Katastrophenschutzsystem und Versicherungen; ihre **Anpassungsfähigkeit** ist groß. In Bangladesch sind viele Menschen arm, leben von der Landwirtschaft, wohnen in einfachen Häusern und können ihren Besitz nicht ersetzen; die **Empfindlichkeit** ist hoch. Entwicklung (GL7) ist deshalb oft die beste Anpassung.

9.2 Anpassung auf verschiedenen Maßstabsebenen

Global: Das Pariser Abkommen hat ein globales Ziel für Anpassung. Die Industrieländer haben zugesagt, die Entwicklungsländer bei Klimaschutz und Anpassung finanziell zu unterstützen, auf der Klimakonferenz in Baku 2024 mit mindestens 300 Milliarden US-Dollar pro Jahr bis 2035. Seit der Klimakonferenz in Dubai 2023 gibt es außerdem einen **Fonds für Verluste und Schäden** für Folgen, an die man sich nicht mehr anpassen kann.

Europa und Deutschland: Seit dem 1. Juli 2024 gilt das **Bundes-Klimaanpassungsgesetz**. Es verpflichtet den Bund zu einer vorsorgenden Anpassungsstrategie mit messbaren Zielen; die Bundesregierung beschloss sie am 11. Dezember 2024. Die Länder müssen eigene Strategien vorlegen und dafür sorgen, dass Kommunen Anpassungskonzepte erstellen.

Land: Baden-Württemberg hat Anpassung im KlimaG BW verankert und eine eigene Anpassungsstrategie mit Handlungsfeldern wie Wald, Wasser, Landwirtschaft, Gesundheit und Stadtentwicklung.

Kommune: Hier wird Anpassung konkret:

- **Hitze:** Hitzeaktionspläne (Warnungen, kühle Räume, Hilfe für Alte und Kranke), Bäume und Grünflächen, helle Oberflächen, **Frischluftschneisen**. Stuttgart betreibt seit Jahrzehnten Stadtklimatologie und hält Hänge und Täler frei, damit nachts kühle Luft in den Talkessel fließt.
- **Starkregen:** Das Prinzip **Schwammstadt** hält Regenwasser zurück, statt es schnell abzuleiten: entsiegelte Flächen, Gründächer, Mulden und Rigolen, Notwasserwege, Starkregengefahrenkarten.

- **Hochwasser und Küsten:** Rückhaltebecken, Deichrückverlegung, mehr Raum für Flüsse. Die Niederlande haben im Programm „Raum für den Fluss“ an Dutzenden Stellen Deiche zurückverlegt und Überflutungsflächen geschaffen; an der deutschen Nordseeküste baut man **Klimadeiche**, die so breit angelegt sind, dass man sie später erhöhen kann.
- **Wasser und Land- und Forstwirtschaft:** Umbau der Wälder zu Mischwäldern mit trockenheitsverträglichen Arten, Bewässerung, neue Sorten, Wasserspeicher.

Individuell: Versicherung gegen Elementarschäden, Hitzeschutz in der Wohnung, Verhalten bei Hitze und Unwetter.

9.3 Bewertung von Anpassungsmaßnahmen

Nicht jede Anpassung ist gut. Eine Klimaanlage schützt vor Hitze, verbraucht aber Strom und heizt die Stadt draußen zusätzlich auf. Ein höherer Deich schützt die Stadt dahinter, kann aber das Hochwasser flussabwärts verschärfen. Solche Maßnahmen, die das Problem verlagern oder neue schaffen, nennt man **Fehlanpassung**. Gute Anpassung erfüllt möglichst mehrere Ziele zugleich: Stadtgrün kühlt, hält Regen zurück, bindet CO_2 und verbessert die Lebensqualität (**Synergie** von Klimaschutz und Anpassung).

Kriterium	Klimaschutz (Mitigation)	Anpassung (Adaptation)
Ansatz	bekämpft die Ursache	begrenzt die Folgen
Nutzen	weltweit, langfristig, für alle	lokal, sofort, für den, der handelt
Zeitpunkt der Wirkung	Jahrzehnte (Trägheit des Klimas)	sofort bis Jahre
Problem	Trittbrettfahrer: andere profitieren mit	stößt an Grenzen (Inselstaaten, Gletscher)
Beispiel	Windpark, CO_2-Preis, Moorschutz	Deich, Schwammstadt, Frühwarnsystem

Tabelle 27: Klimaschutz und Anpassung im Vergleich.

Merksatz

Anpassung verringert die Verwundbarkeit gegenüber den Folgen des Klimawandels. Sie ist umso nötiger, je weniger Klimaschutz gelingt, stößt aber an Grenzen. Bewertet wird sie nach Wirksamkeit, Kosten, Nebenwirkungen (Fehlanpassung), Gerechtigkeit und Synergien mit dem Klimaschutz.

Fachbegriffe des Bildungsplans

Anpassungsstrategie geplantes Bündel von Maßnahmen, um Schäden durch den Klimawandel zu verringern und Chancen zu nutzen (Adaptation), z. B. Deutsche Anpassungsstrategie 2024, Schwammstadt.

Üben: **noctua** ↗

10 Klimaneutral leben und arbeiten

BP 3.5.3.2 (4)

Klimaschutz ist nicht nur Sache von Regierungen. Jeder Einzelne, jede Schule und jeder Betrieb verursacht Emissionen und kann sie verringern. Der Bildungsplan verlangt, klimaneutrale Lebens- und Arbeitsweisen auf der lokalen Ebene zu beschreiben und eigene Handlungsansätze zu entwickeln.

10.1 Klimaneutralität

Definition

Klimaneutralität bedeutet, dass eine Person, eine Organisation, ein Produkt oder ein Staat in der Bilanz keine Treibhausgase in die Atmosphäre abgibt: Unvermeidbare Emissionen werden durch die Entnahme einer gleich großen Menge ausgeglichen (netto null). Genauer spricht man von **Treibhausgasneutralität**, wenn alle Treibhausgase gemeint sind, und von CO_2-Neutralität, wenn nur CO_2 gemeint ist.

Der Weg zur Klimaneutralität folgt einer Rangfolge: **vermeiden** vor **verringern** vor **ausgleichen**. Ausgleich (**Kompensation**) heißt, für jede ausgestoßene Tonne eine Tonne an anderer Stelle einzusparen oder zu binden, etwa durch Aufforstungs- oder Energieprojekte im Globalen Süden. Kompensation ist umstritten: Viele Projekte hätten die Einsparung ohnehin erbracht, Wälder können abbrennen, und Firmen werben mit „klimaneutralen" Produkten, ohne ihre eigenen Emissionen zu senken. Die EU verbietet deshalb ab 2026 Werbung mit Klimaneutralität, die nur auf Kompensation beruht.

10.2 Ökologischer Fußabdruck und CO_2-Bilanz

Der **ökologische Fußabdruck** misst, wie viel biologisch produktive Fläche (Acker, Weide, Wald, Fischgründe und die Waldfläche, die nötig wäre, um das ausgestoßene CO_2 zu binden) nötig ist, um den Konsum eines Menschen, eines Landes oder der Menschheit zu decken. Er wird in **globalen Hektar** angegeben und der **Biokapazität** gegenübergestellt, also der Fläche, die tatsächlich zur Verfügung steht. Das Global Footprint Network berechnet daraus den **Erdüberlastungstag**: den Tag, an dem die Menschheit (oder ein Land) die Ressourcen verbraucht hat, die die Erde in einem ganzen Jahr erneuern kann. Weltweit liegt er seit einigen Jahren Ende Juli. Für Deutschland fiel er 2026 auf den 10. Mai: Lebten alle Menschen wie die Deutschen, bräuchte man knapp drei Erden ($365 : 130 \approx 2{,}8$).

Speziell für das Klima betrachtet man den **CO_2-Fußabdruck**, die Treibhausgasemissionen, die ein Mensch durch seinen Konsum verursacht, einschließlich der Emissionen bei der Herstellung importierter Waren. In Deutschland sind es im Durchschnitt knapp 10 t CO_2-Äquivalente pro Person und Jahr (Abbildung 148). Klimaverträglich wäre langfristig weniger als 1 t.

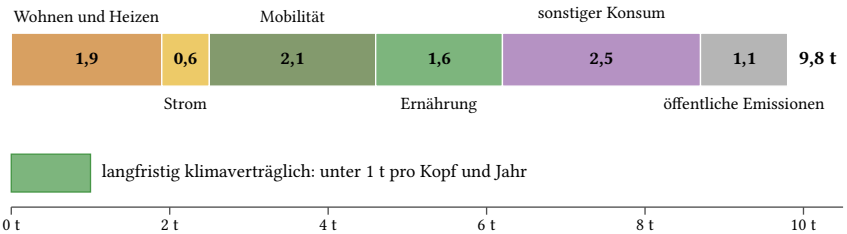


Abbildung 148: Durchschnittlicher CO_2-Fußabdruck pro Kopf in Deutschland, aufgeteilt nach Bereichen, in Tonnen CO_2-Äquivalenten pro Jahr. Daten: Umweltbundesamt (2025).

Ein Teil des Fußabdrucks (die öffentlichen Emissionen, etwa für Straßen, Verwaltung und Schulen) lässt sich individuell kaum beeinflussen. Der Rest hängt stark vom Lebensstil ab. Einige Größenordnungen: Ein Hin- und Rückflug von Frankfurt nach New York verursacht pro Person etwa 3 bis 4 t CO_2-Äquivalente, ungefähr ein Drittel des Jahres-Fußabdrucks. Eine überwiegend pflanzliche Ernährung kann die Emissionen der Ernährung etwa halbieren. Ökostrom senkt den Strom-Anteil auf nahezu null.

Typischer Fehler

Falsch: „Wenn ich mich klimafreundlich verhalte, ändert das nichts, solange die Politik nichts tut."

Richtig: Individuelles Handeln und Politik ergänzen sich: Politik setzt Rahmen (Preise, Infrastruktur, Gesetze), die klimafreundliches Verhalten erleichtern; individuelles Handeln, Vorbilder und Wahlentscheidungen verändern, was politisch durchsetzbar ist.

Der Begriff „CO_2-Fußabdruck" wurde in den 2000er-Jahren von einem Ölkonzern in einer Werbekampagne bekannt gemacht, die die Verantwortung auf den Einzelnen lenkte. Beides gilt: Der Einzelne hat Einfluss, aber ohne veränderte Rahmenbedingungen kommt er nicht unter 1 t.

10.3 Lokale Agenda 21

Die **Lokale Agenda 21** geht auf Kapitel 28 der Agenda 21 von Rio (1992) zurück: Jede Kommune soll mit ihren Bürgern, Vereinen, Unternehmen und Initiativen ein eigenes Handlungsprogramm für nachhaltige Entwicklung erarbeiten, nach dem Motto „Global denken, lokal handeln". In Deutschland haben Tausende Gemeinden solche Prozesse begonnen, oft mit Arbeitskreisen zu Energie, Verkehr, Eine Welt oder Umweltbildung. Viele dieser Gruppen sind später in Klimaschutzkonzepten, Energiegenossenschaften, Weltläden oder Nachhaltigkeitsbeiräten aufgegangen; heute knüpfen Kommunen eher an die SDGs der Agenda 2030 an (z. B. mit der Musterresolution des Deutschen Städtetags). Kennzeichnend bleibt die **Beteiligung**: Lösungen werden nicht nur von der Verwaltung beschlossen, sondern gemeinsam mit den Bürgern entwickelt.

10.4 Handlungsansätze entwickeln

Klimaneutral leben und arbeiten heißt, in allen Bereichen die Emissionen zu senken. Tabelle 28 ordnet Möglichkeiten nach Bereichen und Ebenen.

Bereich	privat	Schule, Betrieb, Gemeinde
Mobilität	Rad, Fuß, Bus und Bahn; Mitfahren; Bahn statt Flugzeug	sichere Radwege, Jobticket, Ladesäulen, Homeoffice, Videokonferenzen
Wohnen und Energie	Ökostrom, richtig heizen und lüften, Geräte ausschalten	Dämmung, Wärmepumpe, Photovoltaik auf dem Dach, Fernwärme, Energiemanager
Ernährung	weniger Fleisch und Milchprodukte, regional und saisonal, nichts wegwerfen	Mensa mit pflanzlichen Gerichten, Schulgarten, Resteverwertung
Konsum	länger nutzen, reparieren, leihen, gebraucht kaufen	Beschaffung nach Umweltkriterien, Repair-Café, Tauschbörse
Beteiligung	informieren, wählen, sich engagieren	Klimaschutzkonzept, Lokale Agenda, Energiegenossenschaft, Schülerfirmen

Tabelle 28: Handlungsansätze für klimaneutrales Leben und Arbeiten auf lokaler Ebene (Auswahl).

Ein eigenes Projekt, etwa „Unsere Schule auf dem Weg zur Klimaneutralität", lässt sich in Schritten planen:

a) **Bestandsaufnahme:** Wo entstehen die Emissionen? (Heizung, Strom, Schulweg, Mensa, Klassenfahrten, Papier.) Dazu Zählerstände, Umfragen, CO_2-Rechner.
b) **Ziele setzen:** messbar und mit Zeitpunkt (z. B. Stromverbrauch bis Schuljahresende um 10 % senken).
c) **Maßnahmen auswählen und bewerten:** nach Wirkung (Tonnen CO_2), Kosten, Machbarkeit, Akzeptanz.
d) **Umsetzen und beteiligen:** Verantwortliche festlegen, Partner suchen (Schulträger, Stadtwerke, Förderprogramme).
e) **Überprüfen:** Erfolge messen, berichten, nachsteuern.

Merksatz

Klimaneutralität heißt netto null Emissionen; der Weg führt über vermeiden, verringern und erst zuletzt ausgleichen. Der ökologische Fußabdruck und der CO_2-Fußabdruck machen den eigenen Verbrauch messbar. Die Lokale Agenda 21 überträgt nachhaltige Entwicklung mit Bürgerbeteiligung auf die Gemeinde.

Fachbegriffe des Bildungsplans

Klimaneutralität Zustand, in dem in der Bilanz keine Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen, weil unvermeidbare Emissionen durch Entnahme ausgeglichen werden (netto null).

Lokale Agenda 21 Handlungsprogramm einer Kommune für nachhaltige Entwicklung, gemeinsam mit den Bürgern erarbeitet (Kapitel 28 der Agenda 21, Rio 1992).

ökologischer Fußabdruck biologisch produktive Fläche in globalen Hektar, die nötig ist, um den Konsum eines Menschen oder Landes dauerhaft zu decken; verglichen mit der Biokapazität.

Üben: **noctua** ↗

