



UmweltWissen

Wege in die Klimazukunft: Szenarien und Optionen

Abzuschätzen, wie sich das Klima verändern wird, ist schwer genug, wenn man allein die naturwissenschaftliche Seite betrachtet: Zwar liegen mittlerweile viele Daten zur Klimageschichte und zu den aktuellen Entwicklungen des Klimasystems vor. Auch die Modellierungen sind inzwischen ausgefeilt.

Aber für einen rein naturwissenschaftlichen Ansatz fehlen weitere, entscheidende Aspekte: Auch das Wirtschaftswachstum, Energiesysteme und Technologien spielen eine große Rolle – und darüber hinaus auch die sozialen und gesellschaftlichen Entwicklungen. Unsere Klimazukunft hängt entscheidend davon ab, ob wir weltweit für ausreichend Stabilität, Bildung, Gesundheit und soziale Gerechtigkeit sorgen können.

Diese Publikation zeigt, wie viel Wissen und Sorgfalt weltweit in die Szenarien einfließt, mit der die Klimaforschung die notwendigen Entscheidungen vorbereitet. Essenziell ist dabei, dass Klimaschutz und Klimaanpassung Hand in Hand gehen.

Lesen Sie rein!

KLIMASYSTEM: KOMPLEX, LANGFRISTIG, VARIABEL

Das Klimasystem der Erde ist **komplex**: Es hat also **sehr viele Komponenten**, die fortwährend aufeinander einwirken. Zum Beispiel beruht der Treibhauseffekt auf der Zusammensetzung der Gase in der Atmosphäre. Durch den anthropogenen, also den menschlichen Einfluss wird es an der Erdoberfläche wärmer, die Pflanzen wachsen schneller, Schnee und Eis schmelzen, Wasser verdunstet – kurz: Viele Prozesse verändern sich. Das wirkt sich auf die Zusammensetzung der Atmosphäre aus, was wiederum den Treibhauseffekt beeinflusst. Wer das Klimasystem der Erde verstehen will, muss also viele Komponenten untersuchen. Wichtige Aspekte sind zum Beispiel: Lufthülle, Ozeane, Landoberflächen, Schnee und Eis, Gewässer, Vegetation, Strahlung, Wolken, Böden.

Wir spüren bereits deutliche Anzeichen des Klimawandels. Die Folgen werden Jahrhunderte andauern.

Darüber hinaus verändert sich das Klimasystem nur sehr langsam, so dass Veränderungen für uns nicht wahrnehmbar sind: Diese **Prozesse wirken langfristig** – so wie unser heutiges Klima das Ergebnis der seit etwa 150 Jahren ausgestoßenen Treibhausgase ist, werden sich unsere heutigen Entscheidungen erst in Jahrzehnten voll auswirken und über Jahrhunderte zu spüren sein. Allerdings gibt es **Kipppunkte**, an denen sich das Klima rasch und unwiderruflich ändert. Wichtig sind hier folgende Prozesse: Die Zirkulation in den Ozeanen und ihre Versauerung, das Auftauen der Permafrostböden, das Abschmelzen der Polkappen und die Stabilität von Korallenriffen, Savannen und Wäldern, insbesondere des Amazonas-Regenwaldes.

Wissenswert

Wetter kann man fühlen – Klima ist Statistik

Was wir spüren und sehen, ist das **Wetter**, also Sonne, Wolken, Regen, Wind, Hitze oder Kälte. Ebenso wie der Wechsel der Jahreszeiten, gehören sie zur sogenannten **Klimavariabilität**, also zur kurzfristigen und zeitlich begrenzten Schwankung um einen mittleren Zustand.

Wer von **Klima** spricht, meint die Wetterschwankungen **über mindestens 30 Jahre**. Beispiele für **Klimaänderungen** sind die längerfristige Abkühlung nach Vulkanausbrüchen, zyklische Änderungen durch die Sonnenaktivität (elf bis 80 Jahre) und durch die Veränderungen der Erdbahn (bis 100.000 Jahre). Auch die Wanderung von Kontinenten in andere Klimazonen führt zu Klimaänderungen (Jahrtausenden).

Die **durch den Menschen verursachte Klimaänderung** vollzieht sich dagegen sehr viel schneller. Das zeigen die Daten von vielen Forschungsgruppen weltweit. Mittlerweile spüren wir bereits die Auswirkungen.

KLIMADATEN: EIN KOMPLEXES SYSTEM KENNENLERNEN

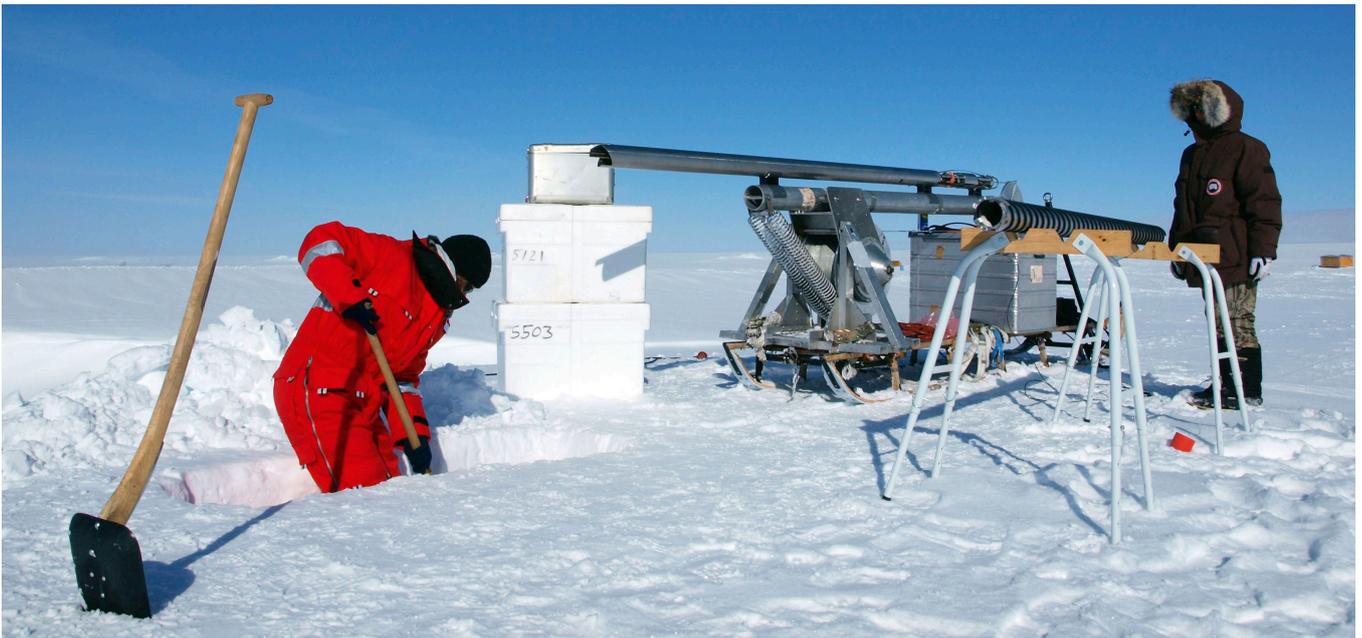
Die Klimaforschung erhebt weltweit Daten, um das Klimasystem immer besser zu verstehen. Dazu dienen zum einen Daten aus der Vergangenheit, die die Prozesse und Zusammenhänge erkennen lassen. Zum anderen ergänzen die aktuellen Klimadaten das Bild und zeigen die weitere Entwicklung immer genauer.

Die Klimaarchive zeigen: Konstant ist nur der Wandel

Das Klima hat sich im Lauf der Erdgeschichte immer wieder sehr stark gewandelt. Die Spuren dieser Veränderung sind bis heute in den verschiedensten Klimaarchiven konserviert: Zentral sind die **Eisbohrkerne**, in denen kleine Luftblasen aus der Zeit eingeschlossen sind, in der das Eis entstand. Die zum Teil mehrere Millionen Jahre alte Luft ist von unschätzbarem Wert, denn in ihr kann man die Gaszusammensetzung der damaligen Atmosphäre direkt messen.

Auch **Sedimentbohrungen** enthalten sehr viel Information: Aus den **Ablagerungen in Seen und Mooren** kann man regional die Vegetation und das Klima für mehrere hunderttausend Jahre rekonstruieren. Die **Ablagerungen in den Ozeanen** reichen sogar viele hundert Millionen Jahre zurück.

*Abb. 1:
Weltweit sammeln Arbeitsgruppen Daten, um das Klimasystem immer besser zu verstehen. Zentral sind zum Beispiel die Eisbohrkerne, in denen kleine Luftblasen aus der Zeit eingeschlossen sind, in der das Eis entstand. So kann man die Gaszusammensetzung der damaligen Atmosphäre direkt messen.*



Wo Daten aus Eis- oder Sedimentbohrungen fehlen, greift man auf andere Klimaarchive zurück: So kann man anhand von **geologischen Formationen** und Gesteinsschichten auf das Klima der ältesten Erdperioden schließen. Für jüngere Epochen liefert die **Form der Erdoberfläche** gute Hinweise. **Biologische Klimaarchive** wie Korallenriffe oder Bäume zeigen die jüngsten Erdperioden, denn sie wachsen in günstigem Klima stärker. Auch **Wetterbeobachtungen** liefern Anhaltspunkte, zum Beispiel aus dem Observatorium Hohenpeißenberg, wo bereits 1758 erste Notizen gemacht wurden. Sogar Weinchroniken, Tagebücher, Jagd- und Erntekalender oder Flusspegel können wertvolle Hinweise geben.



Geschichte der Klimaforschung, Zeitleiste der globalen Erwärmung (aip.org)



Deutscher Wetterdienst:
 ↓ Klimaüberwachung

LfU:
 ↓ Klimazentrum

Klimamodelle sind das wichtigste Werkzeug der Klimaforschung. Mittlerweile sind sie sehr präzise.

Es ist keine Frage mehr, ob der Klimawandel kommt. Die Frage ist, wie schnell und wie stark er kommt.

Weltweite Messnetze erforschen die aktuelle Entwicklung

Weltweit arbeiten viele Arbeitsgruppen intensiv an der Erforschung des Klimawandels. Ziel ist, das Klimasystem noch besser zu verstehen und die Folgen der verschiedenen Klimaschutzmaßnahmen einschätzen zu können. Wichtig sind zum Beispiel meteorologische Untersuchungen und Messnetze, Erdbeobachtungssatelliten sowie Messungen von Bodenfeuchte oder Wasserstand von Gewässern.

Auch **regionale Daten aus den verschiedensten Umweltbereichen** sind sehr wertvoll, weil alle Komponenten im Klimasystem eine wichtige Rolle spielen und aufeinander einwirken. Zum Beispiel führt das Bayerische Landesamt für Umwelt zahlreiche Projekte durch, die sich insbesondere der Einschätzung des Klimawandels und seiner Auswirkungen in Bayern und der Anpassung an diese Folgen widmen.

KLIMAMODELLE: AUS DER KLIMAGESCHICHTE AUF DIE KLIMAZUKUNFT SCHLIESSEN

Klimamodelle sind das wichtigste Werkzeug, um das Klimasystem zu verstehen. Sie wurden anhand der Daten der Vergangenheit geprüft und immer weiter verfeinert. Mittlerweile sind sie sehr präzise, weil durch die weltweite Arbeit vieler Forschungsgruppen sehr viele Daten vorliegen, die Rechner leistungsfähiger und die Modelle genauer werden.

Klimamodelle erklären die Messdaten

Heute arbeitet die Klimaforschung mit den sogenannten **Erdsystemmodellen**. Das sind Klimamodelle, die nicht nur die Atmosphäre, sondern auch Prozesse an der Erdoberfläche oder im Ozean berücksichtigen. Sie integrieren also alle Komponenten, die bislang in Einzelmodellen berechnet werden mussten, zum Beispiel Luftströmungen, Ozeane, Vegetation, Wolken und Böden. Außerdem berechnen sie die Kreisläufe von Kohlenstoff, oft auch von Stickstoff oder Schwefel. Sogar Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessen können berücksichtigt werden.

Diese Modelle sind mittlerweile sehr gut, sogar hinsichtlich schwer zu beschreibender Komponenten wie Stoffkreisläufen, Pflanzenwachstum, Luftchemie und kleinräumigem Wasserabfluss. Dagegen wird an vielen kleinräumigen Prozessen und an einer feineren zeitlichen und räumlichen Auflösung noch gearbeitet.

Das Ergebnis der Modellierungen ist beeindruckend klar – und gewinnt kontinuierlich an Schärfe: Die Klimaänderungen, die wir seit einigen Jahrzehnten beobachten, sind durch den Menschen verursacht, vor allem durch den Ausstoß von Treibhausgasen. Das zeigen die Daten der vielen Forschungsgruppen weltweit seit Jahrzehnten und mit immer größerer Sicherheit.

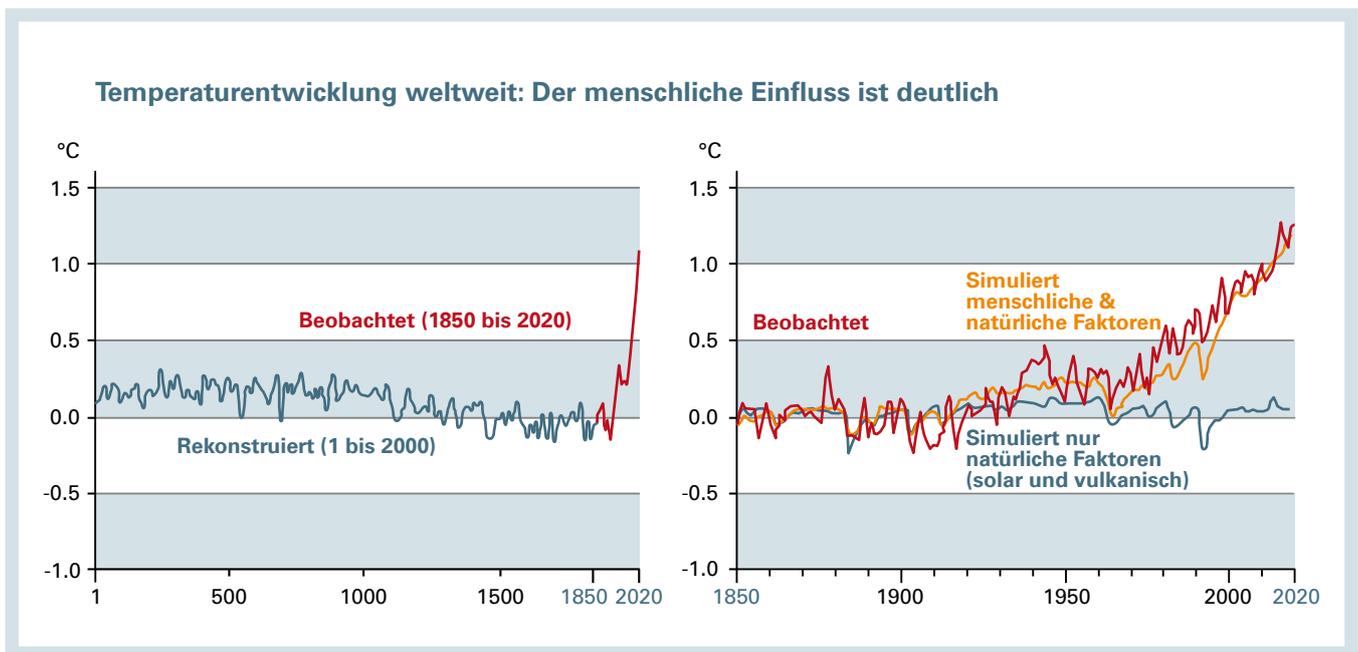


Abb. 2:

Links: Die Temperaturen steigen seit 200 Jahren sehr schnell und sehr stark. Einen solchen Anstieg gab es seit 2.000 Jahren nicht mehr.

Rechts: Ursache sind die Treibhausgase: Die Berechnungen stimmen nur dann mit den Messwerten (Rot) überein, wenn sie den menschlichen Beitrag berücksichtigen, also den Ausstoß von Treibhausgasen (Orange). Allein aufgrund natürlicher Ursachen gäbe es keinen Temperaturanstieg (Blau).

Quelle: IPCC 2021, verändert

Klimamodelle erlauben einen Blick in die Zukunft

Das wichtigste Instrument der Klimaforschung, um einen Blick in die Zukunft zu werfen, sind die sogenannten **Klimaprojektionen**: Sie werden von Modellen berechnet, die anhand von Daten aus der Vergangenheit geprüft wurden. Ein Modell, das die Vergangenheit gut beschreibt, wird angewandt, um die Zukunft zu berechnen. Der maßgebliche Faktor sind dabei die **Emissionspfade**, also wie viele Treibhausgase wann ausgestoßen werden. Klimaprojektionen beziehen sich auf einen längeren Zeitraum. Typischerweise werden sie bis Ende des 21. Jahrhunderts gerechnet.

Klimavorhersagen sind erst in jüngster Zeit entwickelt worden. Sie umfassen Witterungsvorhersagen für einige Wochen, saisonale Vorhersagen für einige Monate und dekadische Vorhersagen über maximal zehn Jahre. Die **Anfangsbedingungen** spielen dabei eine sehr wichtige Rolle, anders als bei den langfristigeren Klimaprojektionen. Klimavorhersagen schließen die Lücke zwischen langfristigen Klimaprojektionen und kurzfristigen Wettervorhersagen.

Wettervorhersagen geben detailliert Auskunft über das Wetter zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem konkreten Ort. Sie werden meist für maximal drei Tage im Voraus berechnet.

SZENARIEN: WEGE IN DIE KLIMAZUKUNFT DURCHSPIELEN

Neben den naturwissenschaftlichen Zusammenhängen gibt es einen weiteren Faktor, der die Klimazukunft entscheidend prägen wird: Wie sich die Menschen in Zukunft verhalten und welche politischen Entscheidungen getroffen werden.

Die Klimaforschung zeigt die langfristigen Folgen der Entscheidungen, die wir heute treffen.

Um das in die Modelle einfließen zu lassen, wurden **Szenarien** entwickelt, die im fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates enthalten sind. Sie enthalten jeweils eine Reihe von Annahmen, zum Beispiel über politische Entscheidungen, technische Entwicklungen und gesellschaftliche Veränderungen. Anschließend werden die Szenarien in die Klimamodelle eingespeist, um die Wirkung auf das Klima abzuschätzen. Am Ende stehen also **Wenn-Dann-Aussagen** wie: Wenn wir heute diese Entscheidungen treffen, wird das jene Folgen für das Klima haben.

Wohin die Reise geht: Klimaziele und ihre Auswirkungen

Ein grundlegender Ansatz des Weltklimarates ist es, die **Auswirkung von verschiedenen Klimazielen** zu beschreiben. Dazu dienen die sogenannten **RCP-Szenarien** (Representative Concentration Pathway, repräsentative Konzentrationspfade, seit 2013/2014). Dem liegt folgende Überlegung zugrunde: Je mehr Treibhausgase in der Atmosphäre sind, desto stärker heizen die Sonnenstrahlen die Erde auf – wissenschaftlich formuliert: Der Strahlungsantrieb ist höher. Dieser Zusammenhang ist so eindeutig, dass man für jeden Strahlungsantrieb sagen kann, wie viele Treibhausgase dafür vorhanden sein müssen – die man jedoch auf verschiedenen Wegen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreichen kann.

Der Spielraum ist bereits zu fast drei Vierteln ausgeschöpft, wenn die Erwärmung noch auf zwei Grad begrenzt werden soll.

Interessant an diesem Ansatz ist, dass man einen konkreten Endpunkt definieren und dann den **verbleibenden Spielraum** berechnen kann. Um zum Beispiel die globale Erwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen, blieben Anfang 2020 noch weitere 900 Gigatonnen CO₂, die zusätzlich in die Atmosphäre gelangen durften – über die zwischen 1850 und 2019 bereits ausgestoßenen 2.390 Gigatonnen hinaus (IPCC 2021, Wahrscheinlichkeit 83 Prozent).



Leibniz Gemeinschaft:
 ↓ Wenige realistische Szenarien

Dieses sogenannte **Kohlenstoffbudget** ist jedoch keine feste Größe, sondern hängt von der Risikobereitschaft ab, da die zukünftige Erwärmung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit berechnet wird: Wer vorsichtiger ist, muss mehr Klimaschutz betreiben. Eins ist jedoch klar: Irgendwann dürfen keine zusätzlichen Treibhausgase mehr in die Atmosphäre gelangen, wenn die Erwärmung gestoppt werden soll – das ist eine grundlegende physikalische Gesetzmäßigkeit. Erst dann wird die Temperatur nicht mehr steigen.

Wissenswert

RCP-Szenarien beschreiben die Auswirkung verschiedener Klimaziele

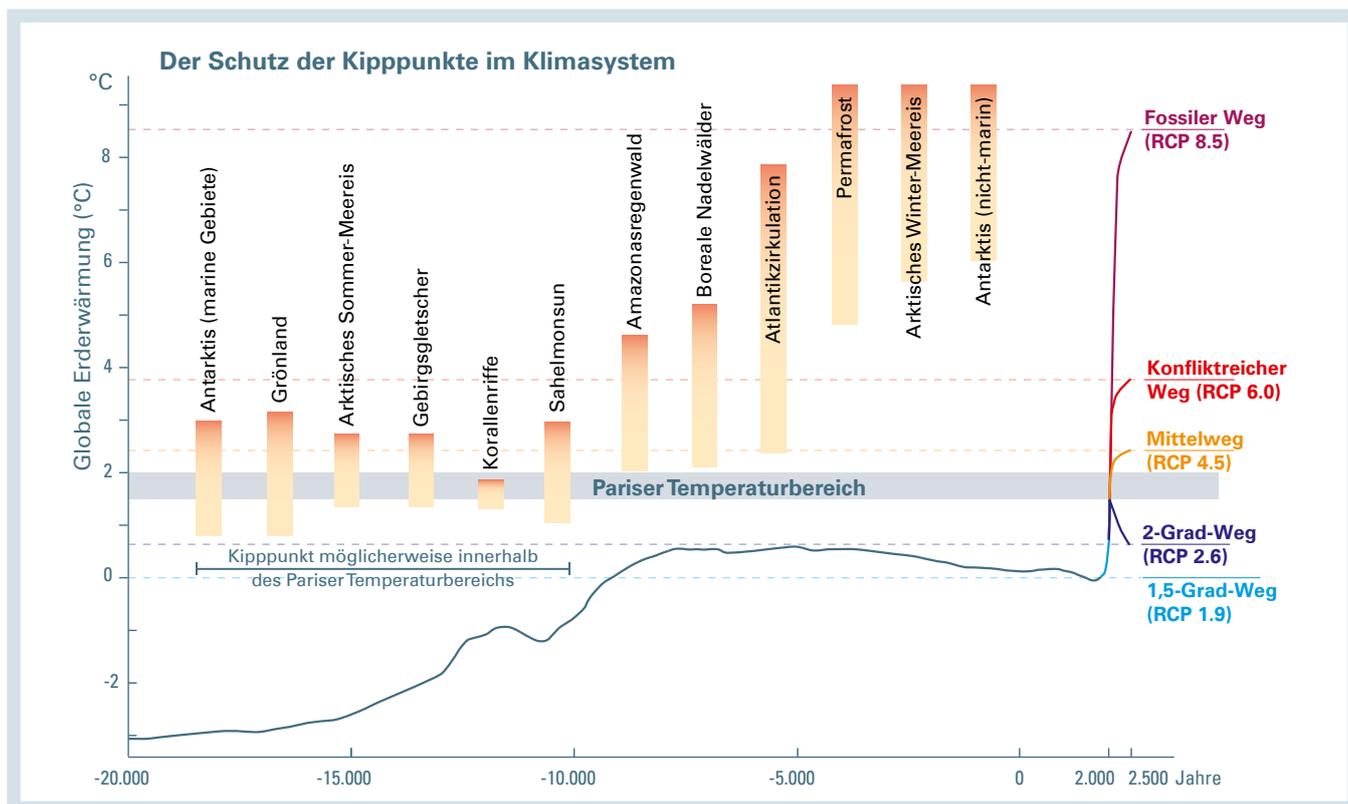
Die RCP-Szenarien unterscheiden sich darin, welche globale Erwärmung sie als Endpunkt definieren. Sie integrieren dabei viele Faktoren, die Emissionen von Treibhausgasen genauso wie zum Beispiel Landnutzungsänderungen. Daraus berechnen die Klimamodelle einerseits die Veränderungen des Klimas, andererseits die zugehörigen Emissionen. Wichtige Szenarien sind zum Beispiel:

- **1,5-Grad-Ziel (RCP 1.9):** Ziel des Pariser Abkommens von 2015 ist es, die Erwärmung möglichst auf 1,5 Grad zu begrenzen. Diese Grenze soll die Kippelemente schützen, vor allem das Eis der Gletscher und Polkappen, die Korallenriffe und den Sahelmonsun. Das Szenario entspricht einem zusätzlichen Strahlungsantrieb von 1,9 W/m² (Watt pro Quadratmeter), gerechnet für das Jahr 2100 gegenüber der vorindustriellen Zeit um 1850.
- **2-Grad-Obergrenze (RCP 2.6):** Wird die Erwärmung auf maximal 2 Grad begrenzt, bleiben die Folgen weitgehend abschätzbar. Für dieses Szenario müssen die Pro-Kopf-Emissionen ab sofort sehr stark sinken und um 2080 den Wert Null erreichen. Der zusätzliche Strahlungsantrieb beträgt 2,6 Watt pro Quadratmeter.
- **Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5):** Die Entwicklung verläuft weiter so wie bisher. Die Emissionen steigen bis etwa 2050 sehr stark an. Der zusätzliche Strahlungsantrieb beträgt 8,5 Watt pro Quadratmeter und führt zu einer mittleren Erwärmung von 4 Grad. Dieses Szenario wird als Worst-Case-Szenario genutzt.

Weitere Szenarien sind **RCP 3.4, RCP 4.5, RCP 6.0** und **RCP 7.0**. Sie bewegen sich zwischen den genannten Varianten.

Nur wenn wir die Erwärmung auf unter zwei Grad begrenzen, bleiben die Folgen weitgehend abschätzbar.

Abb. 3:
Die 1,5-Grad-Grenze des Pariser Klimaschutzabkommens ist deshalb so wichtig, weil sie viele Kippelemente mit hoher Wahrscheinlichkeit schützt.
Quelle: Rahmstorf et al. 2019, verändert



Wege zum Ziel: Die weltweite sozioökonomische Entwicklung einkalkulieren

Für den sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarates wurden als Ergänzung zu den RCP-Szenarien sozioökonomische Szenarien entwickelt, die beschreiben, wie sich **gesellschaftliche und wirtschaftliche Faktoren** im nächsten Jahrhundert verändern könnten (2021/2022). Dazu gehören zum Beispiel Wirtschaftswachstum, technologische Entwicklung, Bildung, Bevölkerungswachstum und Urbanisierung. Diese Faktoren fließen in die sogenannten **SSP-Szenarien** ein (Shared Socioeconomic Pathways, gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade, seit 2022).

Auch hier wird aus der Vielzahl an denkbaren Varianten eine Auswahl getroffen: Die fünf sogenannten **Narrative** beschreiben verschiedene Entwicklungen bis zum Ende des Jahrhunderts. Mit den Klimaprojektionen verknüpft, zeigen sie zum Beispiel, wie leicht oder wie schwer jeweils die Eindämmung des Klimawandels wird. Auch die Herausforderungen, die bei der Anpassung an den Klimawandel auf uns zukommen, sind von der Entwicklung abhängig, die die Weltgesellschaft nimmt.

Wissenswert

SSP-Szenarien für die sozioökonomische Entwicklung

Die SSP-Szenarien unterscheiden sich vor allem darin, wie sie das globale Bevölkerungswachstum, den Zugang zur Bildung, die Urbanisierung, das Wirtschaftswachstum, die Verfügbarkeit von Ressourcen, technologische Entwicklungen und Änderungen des Lebensstils einschätzen: Fünf Narrative sind wichtig.

- **Nachhaltigkeit (SSP1):** Die Welt entwickelt sich zunehmend nachhaltig. Globale Gemeinschaftsgüter werden bewahrt, die Grenzen der Natur werden respektiert. Statt Wirtschaftswachstum steht zunehmend das menschliche Wohlbefinden im Fokus. Einkommensungleichheiten zwischen den Staaten und innerhalb der Staaten werden reduziert. Der Konsum orientiert sich an geringem Material- und Energieverbrauch. Ohne zusätzliche Klimapolitik liegen die CO₂-Emissionen zwischen RCP 4.5 und RCP 6.0, das 2-Grad-Ziel wird also verfehlt.
- **Weiter wie bisher (SSP2):** Die bisherige Entwicklung setzt sich fort. Einkommensentwicklungen einzelner Länder gehen weit auseinander. Es gibt eine gewisse Zusammenarbeit zwischen den Staaten, die jedoch nur geringfügig weiterentwickelt wird. Das globale Bevölkerungswachstum ist moderat und schwächt sich in der zweiten Jahrhunderthälfte ab. Umweltsysteme erfahren eine gewisse Verschlechterung. Ohne zusätzliche Klimapolitik sind die CO₂-Emissionen ähnlich wie beim RCP-8.5-Szenario, also in der Nähe des Worst Case.
- **Regionale Rivalitäten (SSP3):** Eine Wiederbelebung des Nationalismus und regionale Konflikte rücken globale Themen in den Hintergrund. Die Politik orientiert sich zunehmend an nationalen und regionalen Sicherheitsfragen. Investitionen in Bildung und technologische Entwicklung nehmen ab. Ungleichheiten nehmen zu. In einigen Regionen kommt es zu starken Umweltzerstörungen. Ohne zusätzliche Klimapolitik sind die CO₂-Emissionen ähnlich wie beim RCP-8.5-Szenario, also in der Nähe des Worst Case.

- **Ungleichheit (SSP4):** Die Kluft zwischen entwickelten Gesellschaften, die auch global kooperieren, und solchen, die auf einer niedrigen Stufe der Entwicklung mit niedrigem Einkommen und geringem Bildungsstand verharren, nimmt weiter zu. In einigen Regionen ist Umweltpolitik bei lokalen Problemen erfolgreich, in anderen nicht. Ohne zusätzliche Klimapolitik liegen die CO₂-Emissionen zwischen RCP 4.5 und RCP 6.0, das 2-Grad-Ziel wird also verfehlt.
- **Fossile Entwicklung (SSP5):** Die globalen Märkte sind zunehmend integriert, mit der Folge von Innovationen und technologischem Fortschritt. Die soziale und ökonomische Entwicklung basiert jedoch auf der verstärkten Ausbeutung fossiler Brennstoffe mit einem hohen Kohleanteil und einem weltweit energieintensiven Lebensstil. Die Weltwirtschaft wächst und lokale Umweltprobleme wie die Luftverschmutzung werden erfolgreich bekämpft. Ohne zusätzliche Klimapolitik sind die CO₂-Emissionen jedoch ähnlich wie beim RCP-8.5-Szenario, also in der Nähe des Worst Case.

Quelle: Deutsches Klimarechenzentrum: Die **SSP-Szenarien**, ergänzt

Das Zwei-Grad-Ziel ist nur mit zusätzlichem Klimaschutz erreichbar. Je später wir beginnen, desto größer wird die Herausforderung.

Abb. 4:
Die weltweite sozioökonomische Entwicklung bestimmt, wie groß die Herausforderungen für Klimaschutz und Klimaanpassung sind: Nur auf dem Weg einer nachhaltigen Entwicklung werden die Herausforderungen kleiner als wenn wir weitermachen wie bisher. Im Szenario der fossilen Entwicklung wird vor allem der Klimaschutz noch schwieriger. Verstärken sich die Ungleichheiten und Rivalitäten, wird die Anpassung an den Klimawandel sehr stark in den Fokus rücken müssen, bei letzterem stehen wir sogar vor beiden Problemen gleichzeitig.
Quelle: Van Vuuren, Detlef (o. J.), verändert

Ein wichtiges Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass das **Zwei-Grad-Ziel nur mit zusätzlichem Klimaschutz erreichbar** ist, sogar auf dem nachhaltigen Weg (SSP1). Auch im günstigsten Fall kommen also Herausforderungen auf uns zu. Wir haben die Wahl: Entweder wir schützen das Klima vorausschauend oder es erwarten uns teils drastische Veränderungen. Wir können uns begrenzt an die Klimawandelfolgen anpassen, aber ohne weitere Klimaschutzmaßnahmen überschreiten wir schnell die Grenzen der Anpassung. Entscheidend für die zukünftige Entwicklung sind vor allem die internationale Zusammenarbeit, Bildungsniveau und Wohlstand und ihre weltweite Verteilung, der Beginn und die Konsequenz von Klimaschutzmaßnahmen und die Einbeziehung des landwirtschaftlichen Sektors.



Kombinierte Szenarien: Optionen, Herausforderungen und Konsequenzen für den Weg in die Zukunft

Für eine ganzheitliche Betrachtung fasst der Weltklimarat die beiden beschriebenen Ansätze zusammen. Er kombiniert also die Klimaziele und mit den sozioökonomischen Szenarien. So arbeitet er deutlich heraus, welche Klimazukunft auf welchem Weg erreichbar ist – und welche Herausforderungen das jeweils bedeuten wird. Wichtige Kombinationen sind zum Beispiel:

- **1,5-Grad-Weg (SSP1-1.9):** Szenario „Nachhaltigkeit“, kombiniert mit sehr geringen Emissionen; entspricht 1,5-Grad-Ziel des Pariser Abkommens
- **2-Grad-Weg (SSP1-2.6):** Szenario „Nachhaltigkeit“, kombiniert mit reduzierten Emissionen
- **Mittelweg (SSP2-4.5):** Szenario „Weiter wie bisher“, kombiniert mit mittleren Emissionen
- **Konfliktreicher Weg (SSP3-7.0):** Szenario „regionale Rivalitäten“, kombiniert mit hohen Emissionen
- **Fossiler Weg (SSP5-8.5):** Szenario „fossile Entwicklung“, kombiniert mit sehr hohen Emissionen; kein Klimaschutz

Diese Kombinationen zeigen, unter welchen Voraussetzungen es gelingen kann, den Klimawandel zu mildern und die Erwärmung auf 2 oder besser noch 1,5 Grad zu begrenzen, so dass auch die Anpassung an die Folgen noch möglich ist. Einige wichtige Beispiele sind:

- Das 1,5-Grad-Ziel, das so wichtig für den Schutz der Kippunkte ist, kann nur auf dem „nachhaltigen und grünen Weg“ erreicht werden, wenn die Emissionen zusätzlich reduziert werden (SSP1 bzw. RCP 1.9) – und das auch nur, wenn ab etwa 2050 Kohlendioxid aus der Atmosphäre entzogen wird, zum Beispiel durch die Nutzung von Bioenergie und der anschließenden Abscheidung und Speicherung des entstehenden Kohlendioxids.
- Ein wiedererstarkender Nationalismus mit internationalen Rivalitäten macht es sehr schwer, global zusammenzuarbeiten (SSP3). Sogar bei guter technischer Entwicklung kann nicht einmal das 2-Grad-Ziel, bei dem wenigstens die Folgen einigermaßen abschätzbar bleiben, erreicht werden. Das Risiko, die notwendigen Transformationen unter diesen Umständen nicht in Gang zu bringen, ist also sehr hoch.
- Bei starker weltweiter Ungleichheit wird es selbst bei einer rasanten technologischen Entwicklung sehr schwer, das 1,5-Grad-Ziel einzuhalten (SSP4). Auch unter diesen Bedingungen ist das Risiko sehr hoch, dass die notwendigen Veränderungen nicht rechtzeitig eingeleitet werden können.

Internationale Kooperation und die Verringerung globaler Ungerechtigkeiten sind die Voraussetzung dafür, dass die notwendige Transformation rechtzeitig beginnen kann.

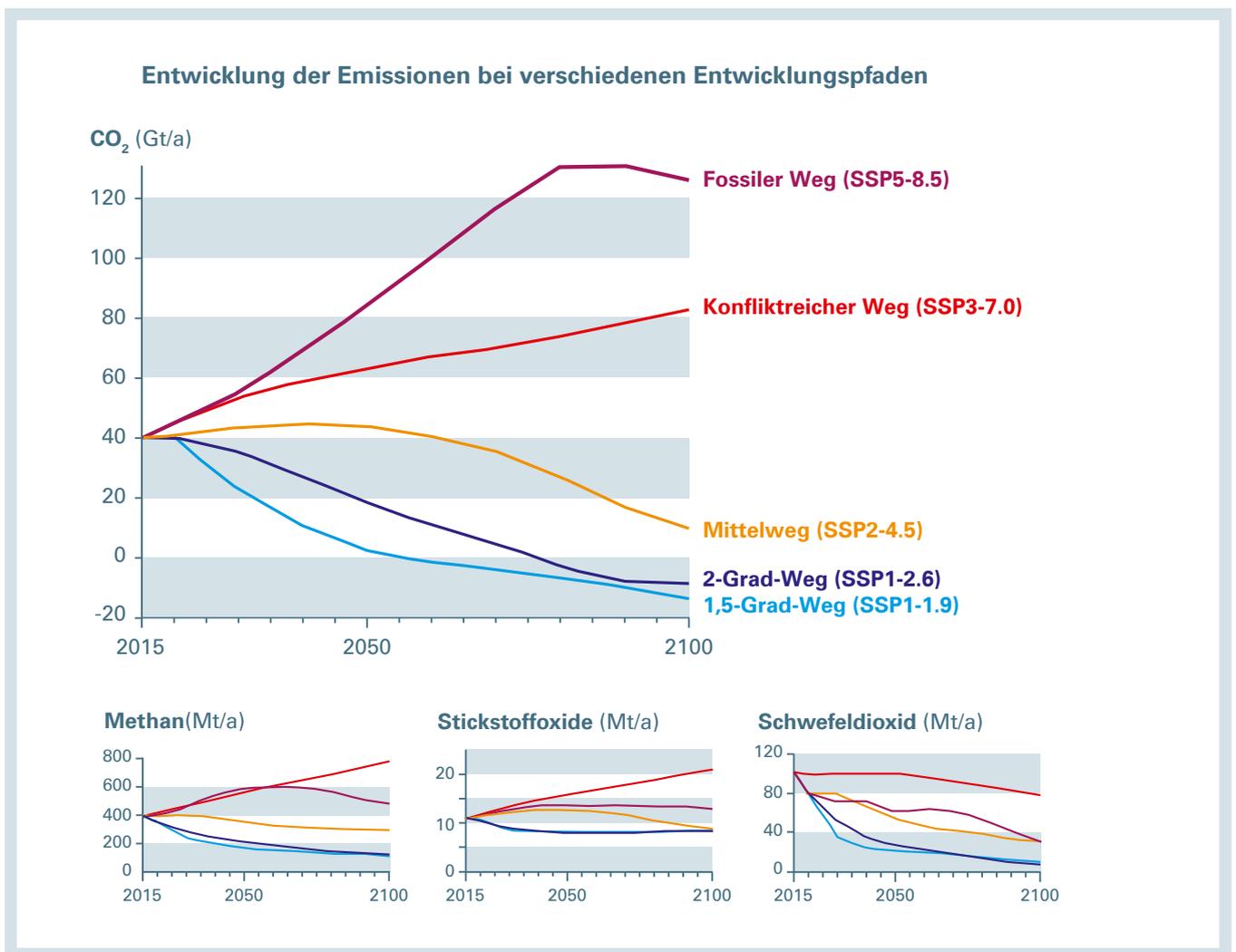


Abb. 5:

Um das Pariser Abkommen einzuhalten, müssen die Emissionen deutlich sinken. Ab etwa 2050 muss zusätzlich CO₂ aus der Atmosphäre entzogen werden (1,5-Grad-Weg (SSP1-1.9, hellblau), 2-Grad-Weg (SSP1-2.6, dunkelblau)).

Alle anderen Varianten verfehlen dieses Ziel: Der mittlere Weg (SSP2-4.5, gelb) überschreitet es nicht so stark wie der konfliktreiche und der fossile Weg, die zu einer sehr starken Erwärmung führen werden (SSP3-7.0, hellrot, bzw. SSP5-8.5, dunkelrot).

Quelle: IPCC 2021, verändert

MODELLKETTEN: VOR ORT DIE FOLGEN DES KLIMAWANDELS ERKENNEN

In Bayern wird es mehr Hitzewellen, längere Trockenzeiten und mehr Starkregen geben. Insbesondere Städte müssen sich schon heute darauf vorbereiten.

Um sich vor Ort wirksam an den Klimawandel anzupassen, sind genauere Aussagen notwendig. Das erfordert weitere Annahmen über gesellschaftliche Entwicklungen und lokale Besonderheiten. So entsteht, aufbauend auf den Szenarien in den globalen Klimamodellen, eine Modellkette.

Mit Hilfe von regionalen Klimamodellen werden die groben Ergebnisse der globalen Modelle auf eine räumliche Auflösung von derzeit etwa ein bis 50 Kilometern Rasterweite verfeinert. Die Ergebnisse dienen ihrerseits als Grundlage für weitere Modellierungen, zum Beispiel zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt eines Flussgebiets.

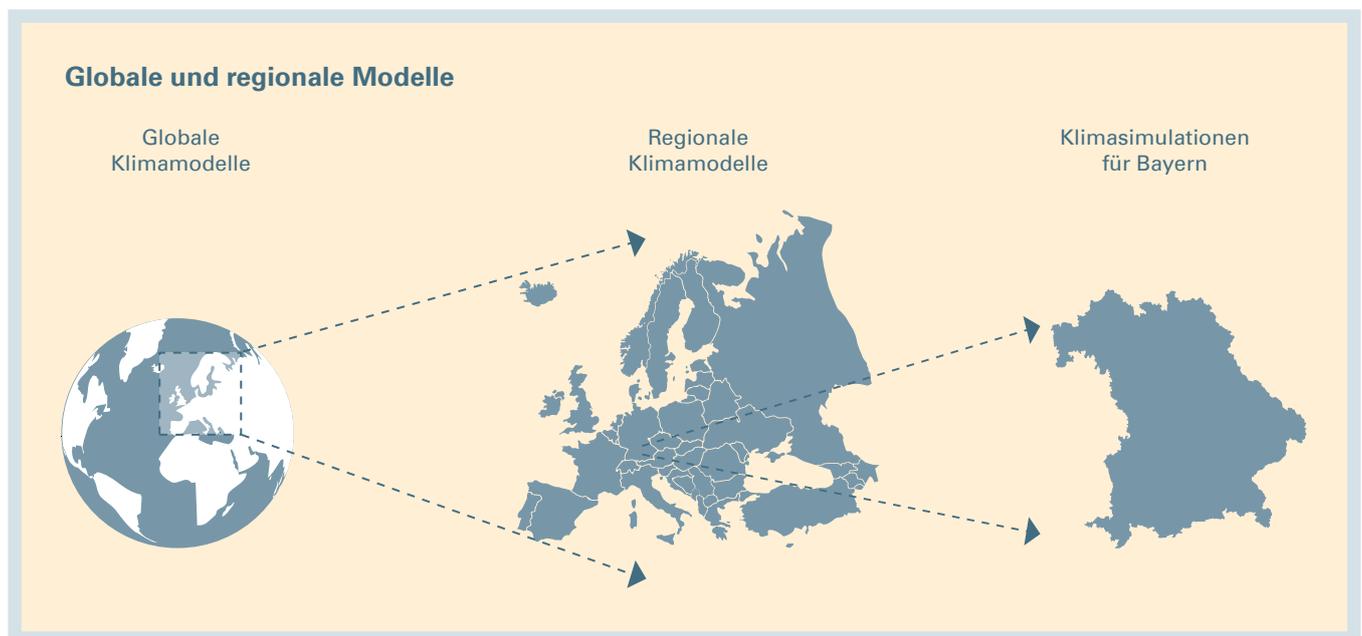


Abb. 6:
Um sich vor Ort wirksam an den Klimawandel anzupassen, sind regional spezifische Aussagen notwendig. Dazu werden mehrere Modelle kombiniert, um auch regionale Besonderheiten zu berücksichtigen.

Wichtig ist zu verstehen, dass die Unsicherheit der Aussage mit jedem Glied der Modellkette steigt: Schon die globalen Klimamodelle liefern keine exakten Projektionen, sondern charakterisieren lediglich einen möglichen mittleren Zustand des Klimas über einen langen Zeitraum. Bei jedem Berechnungsschritt müssen weitere Annahmen getroffen werden, die wiederum unsicher sind: Weder sind alle Klimaprozesse schon vollständig mathematisch formuliert, noch sind gesellschaftliche Entwicklungen sicher vorherzusagen.

Um dieser grundsätzlichen Unsicherheit gerecht zu werden und dennoch belastbare Aussagen zu treffen, verlassen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nie auf ein einziges Ergebnis, sondern rechnen stets mit mehreren Szenarien und Modellen. Sie erhalten dadurch ein Ensemble von Klimaprojektionen und können so einen Korridor festlegen, in dem das künftige Klima voraussichtlich liegen wird.



Bayerisches Landesamt für Umwelt:

- ↓ Beobachtungsdaten, Klimaprojektionsensemble und Klimakennwerte für Bayern
- ↓ Bayerisches Klimainformationssystem (BayKIS)
- ↓ Klimaanpassung in der Stadt

FAZIT UND AUSBLICK

Die Klimaforschung liefert verlässliche Aussagen über den Klimawandel – und zwar mit einer für die Wissenschaft ungewöhnlichen Sicherheit: Über die Vielzahl an Modellen und Szenarien hinweg weisen alle Berechnungen eindeutig auf einen weiteren Anstieg der mittleren Temperaturen hin, sowohl weltweit als auch in Bayern. Außerdem zeigt die Klimaforschung, wie gravierend die Folgen sind. Es ist keine Frage mehr, ob der Klimawandel kommt. Die Frage ist, wie schnell und wie stark er ist. Und die Frage ist, was wir tun.

Für die anstehenden Entscheidungen liefert die Klimaforschung mit ihren Modellen und Berechnungen einen verlässlichen Wegweiser: Es gibt einige gute Wege in die Klimazukunft, wenn wir von Anfang an Klimaschutz und Klimaanpassung zusammen denken. Je mehr Klimaschutz wir betreiben, desto leichter gelingt die Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Andererseits sinkt unsere Anpassungskapazität, wenn der Klimawandel ungebremst fortschreitet.

Bei aller Dringlichkeit gibt es jedoch auch eine gute Nachricht: Wir haben Gestaltungsspielraum, sogar heute noch. Wirksamer Klimaschutz kann die globale Erwärmung immer noch auf zwei Grad begrenzen. Aber dieser Spielraum schrumpft, je länger wir zögern. Wir müssen die notwendige Transformation so schnell wie möglich einleiten, ob global oder lokal, ob auf politischer Ebene oder in unserem Alltag: Wir alle sind gefragt.

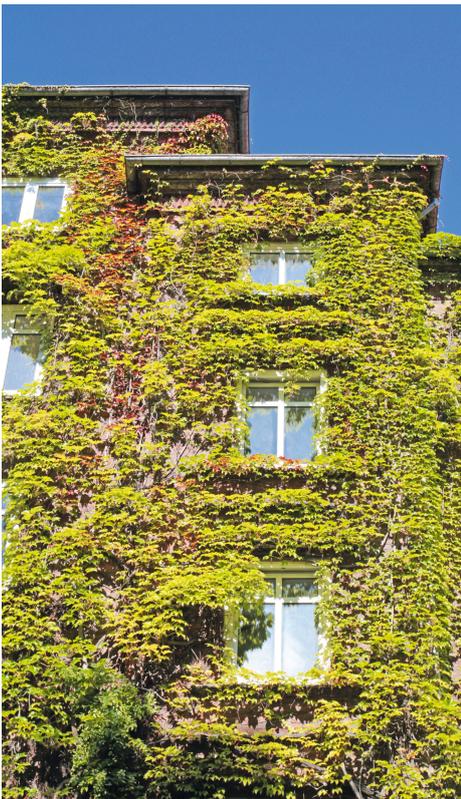


Abb. 7:

Der Klimawandel wird auch in Bayerns Städten deutlich zu spüren sein. Viele Anpassungsmaßnahmen verschönern die Stadt und sind sehr einfach umzusetzen: Begrünte Fassaden machen sogar enge Hinterhöfe zu Stadtoasen.



Abb. 8:

Ein innovatives Konzept ist im „Bosco Verticale“ in Mailand verwirklicht: Die beiden Zwillingstürme beherbergen auf ihren Balkonen rund 900 Bäume und über 20.000 Pflanzen.

LITERATUR UND LINKS

Bayerisches Landesamt für Umwelt:

- ↓ [Klima in Bayern \(2023*\)](#)
- ↓ [Unser Klima ändert sich – der Mensch mischt mit \(2023*\)](#)
- ↓ [Klima-Faktenblätter \(2023*\)](#)
- ↓ [Bayerisches Klimainformationssystem \(2023*\)](#)
- ↓ [UmweltWissen: Klimaanpassung in der Stadt \(2024\)](#)

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2021):

- ↓ [Klima-Report Bayern 2021. PDF, 196 S.](#)

Carbon Brief (2018*): ↓ [Explainer: Wie „Shared Socioeconomic Pathways“ den zukünftigen Klimawandel erforschen](#)

Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle (2023*):

- ↓ [Arbeitsprogramm – Kalender – Übersetzungen](#)

Deutsches Klimakonsortium (2023*):

- ↓ [So funktioniert Klimamodellierung](#)
- ↓ [Ergebnisse des Weltklimarats](#)

Deutscher Wetterdienst:

- ↓ [Klimavorhersagen und Klimaprojektionen \(2021\). PDF, 36 S.](#)
- ↓ [Empfehlungen für die Charakterisierung ausgewählter Klimaszenarien \(2022\). PDF, 9 S.](#)

International Panel on Climate Change (2023*):

- ↓ [Die IPCC-Berichte](#)
- ↓ [Berichte aus dem sechsten Berichtszyklus \(2015–2023\)](#)
- ↓ [IPCC, 2021: Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung \(2022\)](#)

Leibniz-Gemeinschaft (2021*): ↓ [Wenige realistische Szenarien](#)

Quarks (2022*): ↓ [Sechster Weltklimabericht – So steht es wirklich um unser Klima](#)

Rahmstorf, Stefan et al. (2019): [Kipppunkte im Klimasystem. PDF, 7 S.](#)

Stone, Madeleine (2021*): ↓ [Klimawandel: Weltklimarat zeigt fünf mögliche Szenarien für die Zukunft auf. National Geographic](#)

Umweltbundesamt (2022*): ↓ [Klimamodelle und Szenarien](#)

Universität Freiburg (2023*): ↓ [Historische Klimadatenbank tambora](#)

Van Vuuren, Detlef (O.J.): [SSP/RCP-based scenarios: Implementation. PDF, 19 S.](#)

Zentrum Klimaanpassung (2023*): ↓ [Warum Klimaanpassung?](#)

* Zitate von Online-Angeboten vom 05.04.2024

Hinweis zur gedruckten Version: Diese Publikation finden Sie auch als PDF im Internet. Dort sind die mit gelbem Pfeil gekennzeichneten Literaturstellen verlinkt. Sie können also von dort aus auf sie zugreifen oder die jeweiligen Stichworte in eine Suchmaschine eingeben.



Mehr UmweltWissen

- ↓ [Klimaschutz macht Schule](#)

Umweltschutz im Alltag

- ↓ [Weitere Publikationen](#)
- ↓ [Wegweiser für mehr Umweltschutz im Alltag](#)
- ↓ [Alle UmweltTipps](#)

IMPRESSUM

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Telefon: 0821 9071-0
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung:

LfU: Lara Möllney, Dr. Katharina Stroh,
Christopher Zier

Bildnachweis:

LfU, Maria Wöfl: Abb. 6
LfU, Elke Graßmann: Titelbild
LfU, Sabine Schmidbauer: Abb. 2, 3, 4 und 5
© Kara – stock.adobe.com: Abb. 7
© Ivan Kurmyshov – stock.adobe.com: Abb. 8
© UE Images – stock.adobe.com: Abb. 1

Stand:

Juli 2024

Druck:

bonitasprint gmbh
Max-von-Laue-Straße 31
97080 Würzburg
07/2024



Dieses Druckerzeugnis ist mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

