

UmweltWissen – Klima & Energie

Erforschung und Prognose des Klimawandels



Die Klimaforscher sind sich einig: Es wird wärmer. Wieviel und wo und mit welchen Folgen, berechnen sie mit komplexen Computermodellen.

Das Klima ist komplex und nicht unmittelbar wahrnehmbar – was wir spüren und sehen, ist vielmehr das Wetter: Sonne, Wolken, Regen, Wind, Hitze oder Kälte – ein Zustand von Stunden bis Tagen. Dagegen stellt das Klima die Gesamtheit aller tages- und jahreszeitlichen Wetterschwankungen über mindestens 30 Jahre dar. Man unterscheidet dabei zum Beispiel zwischen mediterranem, arktischem, kontinentalem und ozeanischem Klima.

Das Klima der Vergangenheit erforschen Wissenschaftler mit Hilfe verschiedener Klimaarchive. Mit diesen Daten entwickeln sie Computermodelle, die das Klimageschehen abbilden. Ist ein Computermodell in der Lage, das vergangene Klima realistisch zu simulieren, kann es auch für die Abschätzung des zukünftigen Klimas eingesetzt werden. So entstehen die sogenannten Klimaprojektionen, die nach einer sorgfältigen Interpretation Aussagen über zukünftige Klimaänderungen liefern.

Konstant ist nur der Wechsel:

- **Klimavariabilität:** kurzfristig, z. B. der Wechsel der Jahreszeiten
- **Klimaschwankungen:** zeitlich begrenzt, z. B. Abkühlung nach Vulkanausbrüchen, zyklische Änderungen durch die Sonnenaktivität (elf bis 80 Jahre) und durch Veränderungen der Erdbahn (bis 100.000 Jahre).
- **Klimaänderungen:** langfristige und grundlegende Verschiebungen, von Natur aus über Jahrmillionen. Heute erleben wir das in viel kürzerer Zeit.

1 Klimaarchive: Rückblick in die Klimageschichte

Die Klimageschichte hat Spuren hinterlassen: So kann man anhand von **geologischen Formationen** und **Gesteinsschichten** auf das Klima der ältesten Erdepochen schließen. Allerdings wanderten die Kontinente im Lauf der Erdgeschichte. Formationen, die nur in einem bestimmten Klima entstehen, wurden so in andere Klimazonen verschoben. Die Interpretation ist daher oft schwierig. Für das Klima der jüngeren Epochen liefert die **Form der Erdoberfläche** gute Hinweise: So haben die Gletscher der Eiszeiten typische Ablagerungen hinterlassen, anhand derer die Ausdehnung des Eises nachvollziehbar ist.

Biologische Klimaarchive geben Aufschluss über die jüngsten Erdepochen, denn Korallenriffe oder Bäume wachsen in günstigem Klima stärker. Die Abfolge der Wachstumsschichten ähnelt sich daher bei zeitgleich wachsenden Individuen – wenn also die Lebensspannen überlappen, können weit zurückreichende Zeitreihen gebildet werden.

Ablagerungen in Seen und Mooren enthalten viel Information, wenn sich die Schichten ungestört absetzen konnten: In den gemäßigten Breiten sinken im Frühjahr die Schwebstoffe aus dem Schmelzwasser zu Boden, darüber lagern sich abgestorbene Pflanzenteile, Algen und Blütenpollen ab. Daraus kann man regional die Vegetation und das Klima für mehrere hunderttausend Jahre rekonstruieren.

Die **Ablagerungen in den Ozeanen** reichen viele hundert Millionen Jahre zurück. Sie können durch Bodenerosion vom Festland oder durch biologische Prozesse im Meerwasser entstanden sein, etwa durch Schalen von Meeresamöben. Daraus lassen sich Temperaturen, Änderungen des Erdmagnetfelds, Meeresspiegelschwankungen oder Niederschlagsverhältnisse ableiten.

Besonders aussagekräftig sind **Eisbohrkerne** aus der Arktis und Antarktis. Die Luftbläschen in den tieferen Schichten geben Aufschluss über die damalige Zusammensetzung der Atmosphäre. Anhand der Konzentration der Wasserisotope kann auch die Temperatur rekonstruiert werden. Die Datierung ermöglichen eingeschlossene Spurenstoffe – Jahrmillionen zurück.

Interessante Rückschlüsse ermöglichen auch Wetterbeobachtungen. Systematische Aufzeichnungen gibt es seit etwa 300 Jahren. So wurden im Observatorium Hohenpeißenberg bereits 1758 erste Notizen gemacht. Auch **historische Aufzeichnungen** in Weinchroniken, Tagebüchern, Jagd- und Erntekalendern oder Flusspegel lassen Rückschlüsse auf Klimaänderungen zu.

Weitere Informationen:

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: ► [Das Klima der Vergangenheit](#)

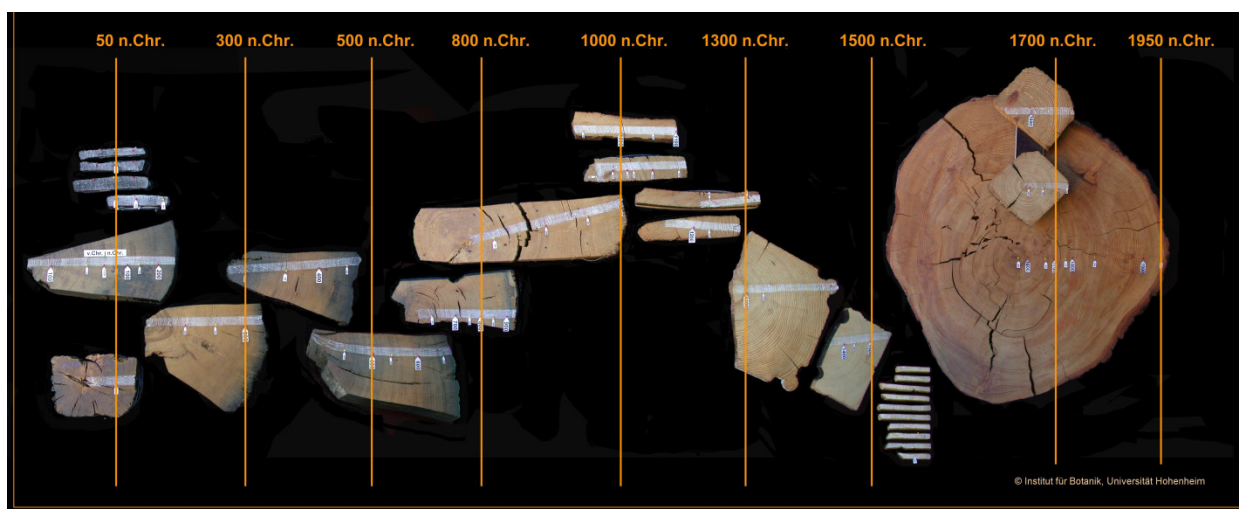


Abb. 1: Hölzer aus historischen Bauten und archäologischen Funden können datiert werden, weil die Jahresringfolge charakteristisch für die Wachstumsbedingungen der Bäume ist. Die Breite der Jahresringe liefert auch Hinweise auf das Klima einer Region. Der Hohenheimer Jahrringkalender reicht 14.600 Jahre zurück.

2 Modellierung: Ein komplexes System verstehen lernen

Mit dem Wissen aus Klimaarchiven entwickelten Wissenschaftler bereits früh die ersten Theorien über das Klima: Schon 1824 beschrieb Jean Baptiste Fourier den natürlichen Treibhauseffekt und die Rolle von Spurengasen. Die ersten mathematischen Berechnungen dazu wurden 1895 vom schwedischen Physiker Svante Arrhenius durchgeführt, der auch als Erster die Bedeutung des vom Menschen emittierten Kohlendioxid für das Klima der Erde errechnete. Das erste Globale Klimamodell, das die atmosphärische Zirkulation beschreibt, wurde 1956 vom Amerikaner Norman Phillips veröffentlicht.

Mit steigenden Rechnerleistungen konnten die Modelle immer mehr Daten und Prozesse berücksichtigen: In den 1980ern kamen die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche hinzu, in den 1990ern die Einflüsse von Ozeanen, Meereisbedeckung und Schwebeteilchen in der Luft. Zuletzt wurden auch Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe, das Pflanzenwachstum und luftchemische Prozesse integriert. Derzeit arbeiten Wissenschaftler an einer feineren zeitlichen und räumlichen Auflösung. Auch die Wolkenbildung und die Beeinflussung von Atmosphäre und Ökosystemen stehen im Fokus. Das Auftauen des Permafrostes und der Methanhydrate ist schwer greifbar und fehlt daher nach wie vor.

Obwohl selbst die komplexesten Modelle nur stark vereinfachte Abbilder der Realität sein können, sind sie unerlässlich, um die vielschichtigen Prozesse des Klimageschehens und ihre Wechselwirkungen zu verstehen. Das Hauptkriterium für ein valides Modell ist, ob es das Klima der Vergangenheit gut simulieren kann. Dann sollte es auch für Zukunftsprojektionen angewendet werden können.

Weitere Informationen:

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: ► [Klimawandel – Warum ändert sich unser Klima?](#)

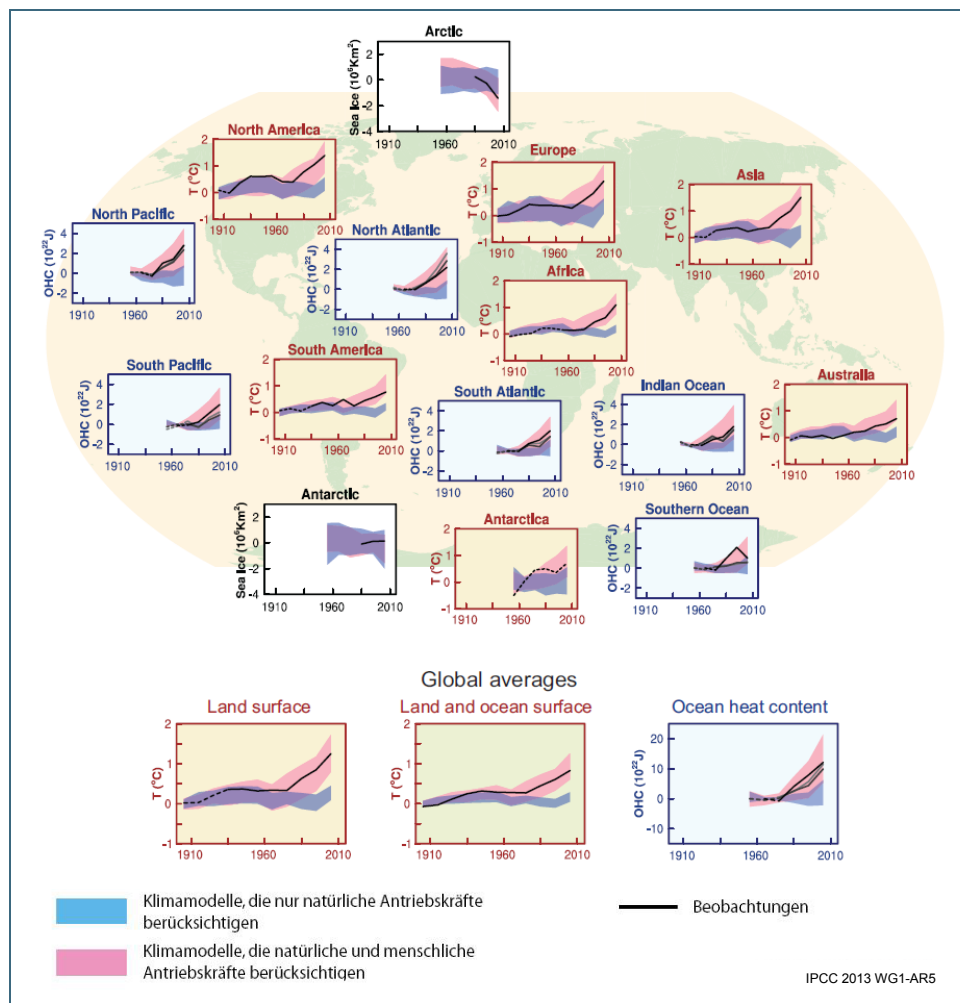


Abb. 2: Globale Klimamodelle zeigen deutlich, dass der menschliche Ausstoß von Treibhausgasen die Klimaerwärmung mit verursacht. Dazu berechnet man die Temperatur ausschließlich mit natürlichen Ursachen (blau) und zusätzlich mit menschlichen Einflüssen (rot).

3 Szenarien: Verschiedene Entwicklungspfade durchspielen

Entscheidend für das Klima ist, wie viel Treibhausgase wir ausstoßen. Dies wiederum hängt davon ab, welche Entwicklung die Gesellschaft nimmt: Wächst die Wirtschaft schnell oder moderat? Boomt die Primärproduktion oder entwickelt sich eine Dienstleistungsgesellschaft? Wie stark wächst die Bevölkerung? Der Weltklimarat hat gezeigt, was das jeweils für die Emissionen und damit für das Klima bedeuten würde – von diesen **Emissionsszenarien** gibt es mittlerweile mehr als 40 Varianten:

- Die **A1-Szenarien** beruhen auf schnellem Wirtschaftswachstum, aber effizienteren Technologien und gebremstem Bevölkerungswachstum. **A1B** beruht auf einer ausgewogenen Nutzung aller Energiequellen und wird häufig verwendet. Ungünstiger sind **A2-Szenarien**, die von schnellem Wirtschaftswachstum ohne große Effizienzfortschritte bei stark wachsender Bevölkerung ausgehen.
- Die **B1-Szenarien** zeigen die günstigste Perspektive, da sie zusätzlich zu A1 einen Umbau in eine Dienstleistungsgesellschaft berechnen. **B2-Szenarien** beschreiben Mischformen aus B1 und A2.

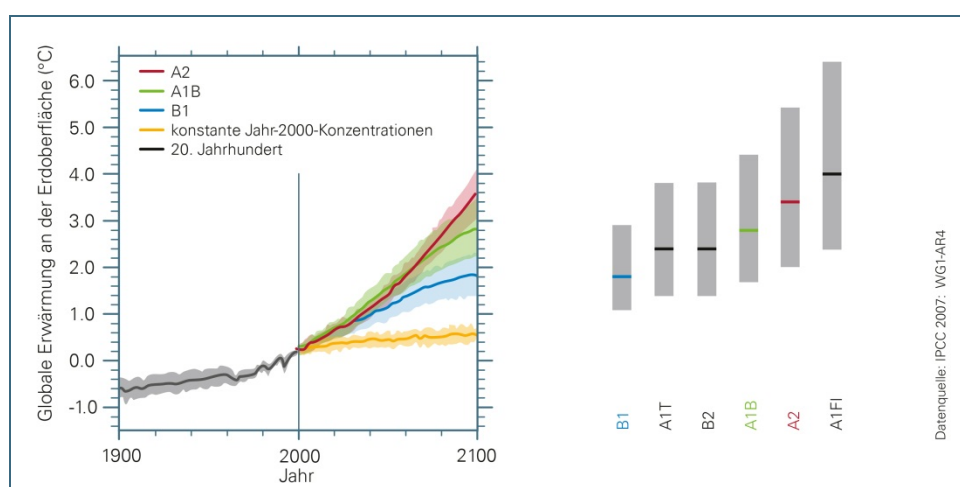


Abb. 3:
Welche Entwicklung die Gesellschaft auch nimmt: Alle Szenarien zeigen, dass es wärmer wird. Die Spannweite reicht von 1,1 bis 6,4 °C im Vergleich zum Zeitraum 1980 bis 1999.

Dargestellt sind jeweils der Mittelwert (Linien) und die Bandbreite (Schattierungen). Rechts sind zusätzlich wichtige Einzelszenarien aufgeführt.

2013 hat der Weltklimarat einen neuen Ansatz gewählt: die **Konzentrationspfad-** oder **RCP-Szenarien** (representative concentration pathway). Ausgangspunkt ist dabei, dass die Erde durch den Treibhauseffekt mehr Energie von der Sonne aufnimmt (Strahlungsantrieb) und sich daher stärker erwärmt. Ein bestimmter Strahlungsantrieb entspricht dabei einer bestimmten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Aus dieser lassen sich verschiedene gesellschaftliche Szenarien berechnen, die zu dieser Konzentration führen würden. Wichtig ist Szenario **RCP 2.6** – es beschreibt einen zusätzlichen Strahlungsantrieb von 2,6 Watt pro Quadratmeter im Jahr 2100 gegenüber der vorindustriellen Zeit um 1850 – das führt zu einer Erwärmung von etwa zwei Grad Celsius. **RCP 8.5** kommt eher der aktuellen Entwicklung gleich.

Zum Vergleich der beiden Berechnungsmethoden: RCP 4.5 passt in etwa zu B1 und RCP 6 liegt zwischen B1 und A1B. RCP 8.5 übersteigt A2.

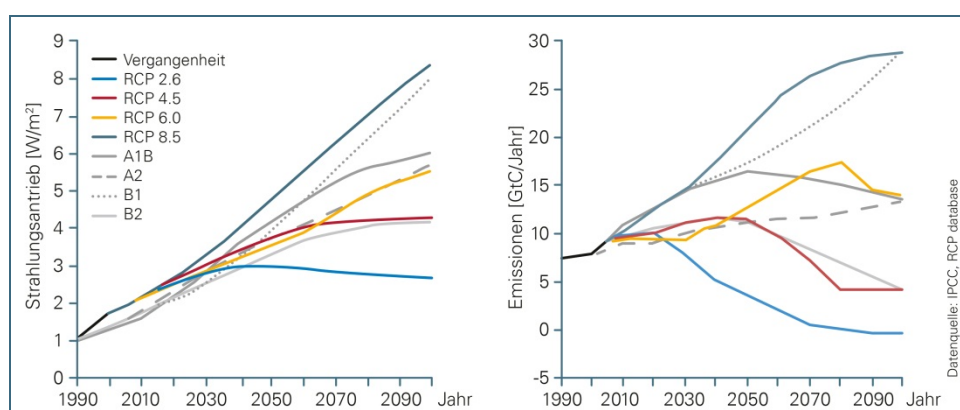


Abb. 4:
Nur wenn wir die Erwärmung auf 2 °C begrenzen, bleiben die Folgen weitgehend abschätzbar: Das neue Szenario RCP 2.6 (hellblau) simuliert dies (links) und die notwendigen Emissionsreduktionen (rechts). Die anderen Szenarien beschreiben eine noch stärkere Erwärmung.

4 Modellketten: Vor Ort die Folgen des Klimawandels erkennen

Die Szenarien des Weltklimarates gehen in Globale Klimamodelle ein, die das Klima in einem groben Raster von etwa 100 Kilometern beschreiben. Um sich jedoch vor Ort wirksam an den Klimawandel anzupassen, sind genauere Aussagen notwendig, die weitere Annahmen über gesellschaftliche Entwicklungen und lokale Besonderheiten erfordern. So entsteht, aufbauend auf den Szenarien des Weltklimarates, eine Modellkette.

Mit Hilfe von **Regionalen Klimamodellen** werden die groben Ergebnisse der Globalen Modelle auf eine räumliche Auflösung von derzeit bei etwa sieben bis 50 Kilometern Rasterweite verfeinert. Ein Rasterfeld entspricht in etwa der Fläche von München. Die Ergebnisse dienen ihrerseits als Grundlage für weitere Modellierungen, zum Beispiel zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt eines Flussgebiets.

Weitere Informationen:

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: ► [Auswertung regionaler Klimaprojektionen – Klimabericht Bayern](#)

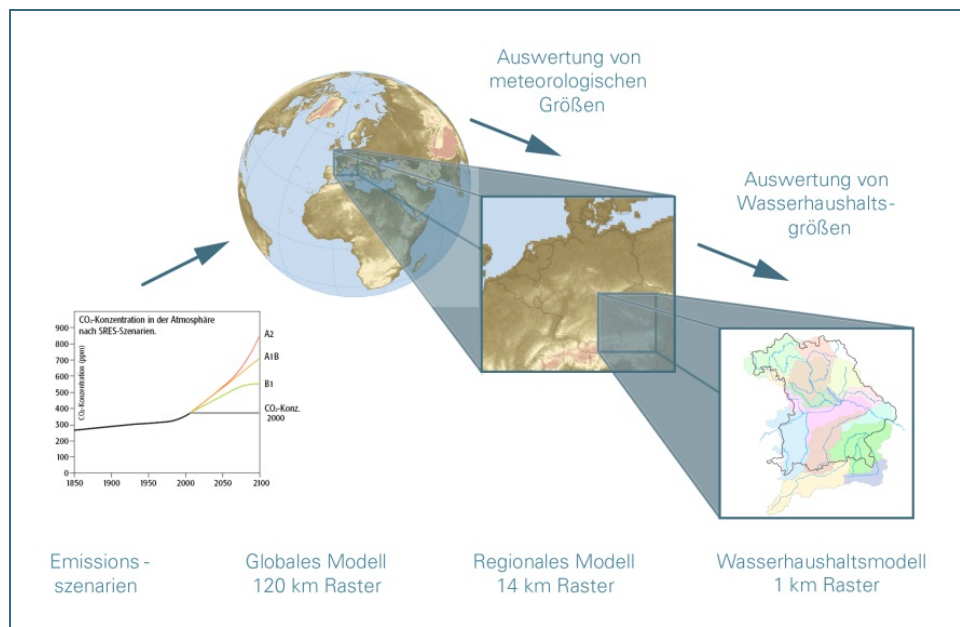


Abb. 5:
Um sich vor Ort wirksam an den Klimawandel anzupassen, sind regional spezifische Aussagen notwendig. Dazu werden mehrere Modelle kombiniert, um auch regionale Besonderheiten zu berücksichtigen.

Wichtig ist zu verstehen, dass die **Unsicherheit der Aussage** mit jedem Glied der Modellkette steigt: Schon die Globalen Klimamodelle liefern keine exakten Vorhersagen, sondern charakterisieren lediglich einen möglichen mittleren Zustand des Klimas über einen langen Zeitraum. Zudem müssen bei jedem Berechnungsschritt 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 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. Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an Klimaprojektionen, die für die einzelnen Regionen meist noch ausgewertet werden müssen.

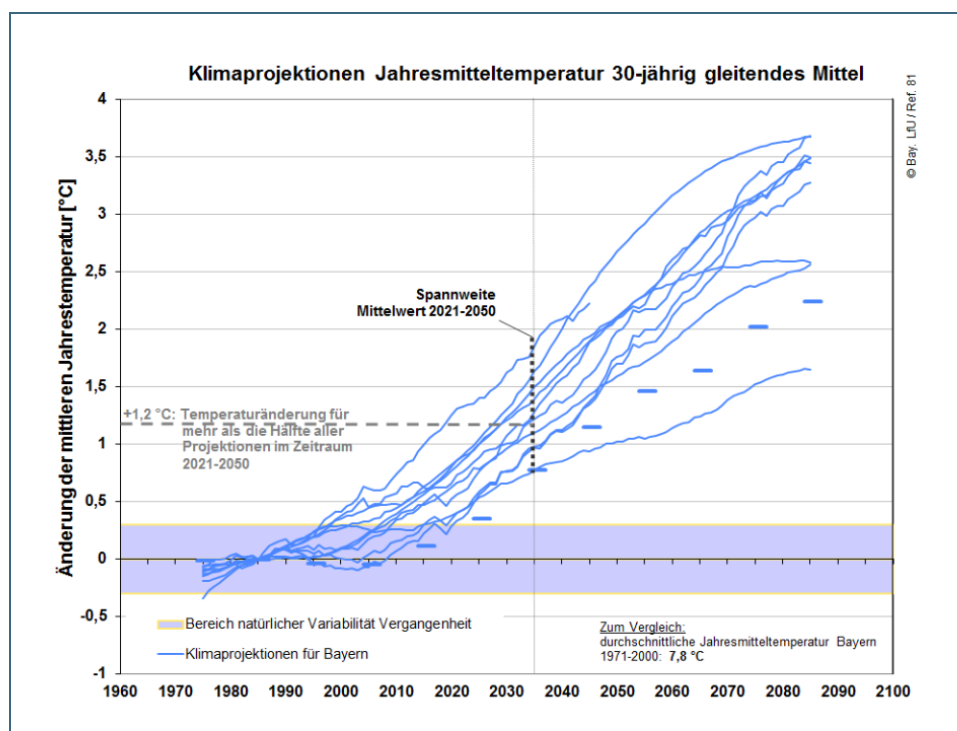


Abb. 6:
Klimaforscher rechnen stets mit mehreren Modellen und Szenarien. So erhalten sie ein Bündel an Klimaprojektionen – in diesem Korridor wird sich das Klima künftig voraussichtlich abspielen. Bei der Temperatur zeigen alle bisherigen Projektionen einen klaren Anstieg.

5 Fazit

Trotz der großen Unsicherheiten der Projektionen und der enormen natürlichen Variabilität des Klimas liefert die Klimaforschung auch belastbare (robuste) Aussagen über zukünftige Veränderungen – eine entscheidende Grundlage für Anpassungsmaßnahmen: Über die Vielzahl an Modellen und Szenarien hinweg zeigen bislang alle Klimaprojektionen einen klaren Anstieg der mittleren Temperaturen – sowohl weltweit als auch in Bayern. Die Klimaforschung zeigt zudem, wie weitreichend die Folgen in nahezu allen Bereichen sein können. Die Fachwelt ist sich einig, dass dies keine kurzfristige Klimaschwankung, sondern eine echte, langfristige Klimaänderung ist.

Damit ist die wissenschaftliche Basis eindeutig. Das dringlichste Ziel ist also die entschlossene Reduktion der Treibhausgase. Da sind Klimapolitiker ebenso gefragt wie wir alle in unserem Alltag. Wer dagegen auf Sicherheit im letzten wissenschaftlichen Detail pocht, kann nicht frühzeitig genug mit den notwendigen Anpassungsmaßnahmen beginnen.

6 Literatur und Links

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:

(2008) [Bayerns Klima im Wandel – erkennen und handeln](#). PDF, 94 S.

(2014*) ► [Das weiß-blaue Klima](#)

(2014*) ► [Unser Klima ändert sich – der Mensch mischt mit](#)

ENDLICHER W., GERSTENGARBE F.-W. (2007): [Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke](#). Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e. V.: PDF, 142 S.

FRIEDRICH M., REMMELE S., KROMER B., SPURK M., HOFMANN J., HURNI J.-P., KAISER K. F. AND KÜPPERS M. (2004): The 12.480-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe - a unique annual record for radiocarbon calibration and palaeoenvironment reconstructions. Radiocarbon 46, S. 1111-1122.

GATES W. L. (2003): [Ein kurzer Überblick über die Geschichte der Klimamodellierung](#). In: Promet. Deutscher Wetterdienst 29, 1–4, S. 3–5. PDF, 140 S.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC):

(2007): [Klimaänderung 2007](#). Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). PDF, 74 S.

(2013): [Summary for Policymakers](#). In: [Climate Change 2013: The Physical Science Basis](#). PDF, 28 S.

RCP data comparison (2008, 2009): ► [RCP-Database](#) Version 2.0.5

KESSLER A. (1984): [Was ist Paläoklimatologie?](#) Mitteilungen der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft 2/1984, S. 50–52. PDF, 4 S.

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT (2014*): ► [Die Geschichte der Klimaforschung und des IPCC](#)

MAX-PLANCK-INSTITUT METEOROLOGIE (2006): [Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert](#). PDF, 28 S.

UNIVERSITÄT AUGSBURG (2014*): ► [Links zur Klimaforschung](#)

UNIVERSITÄT FREIBURG (2014*): ► [Historische Klimadatenbank tambora](#)

* Zitate von Online-Angeboten vom 27.08.2014

7 Weiterführende Informationen

Publikationen aus der Reihe UmweltWissen:

- [Klimawandel – Warum ändert sich unser Klima?](#)
- [Das Klima der Vergangenheit](#)
- [Klimaschutz macht Schule](#)
- [Treibhausgase](#)
- [Biodiversität](#)

Umweltschutz im Alltag: ► [Ansprechpartner](#) und ► [weitere Publikationen](#)

Impressum:

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Telefon: 0821 9071-0

Telefax: 0821 9071-5556

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Bearbeitung:

Ref. 12 / Peter Miehle, Birgit Haas, Dr. Katharina Stroh
Ref. 81 / Dr. Harald Morscheid

Bildnachweis:

Intergovernmental Panel on Climate Change: Abb. 2-3, Institut für Botanik der Universität Hohenheim: Abb. 1, LfU: Abb. 4-6, © vege - Fotolia.com: Titelbild S. 1

Postanschrift:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
86177 Augsburg

Stand:

Neufassung: Dezember 2008
Aktualisierung: September 2014

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird um Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars gebeten.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Broschüre 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. 089 122220 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.