

Klimaforschung

Peter Braesicke

Zusammenfassung

Dieses kurze Essay zur Klimaforschung kann nur einen Ausschnitt beleuchten, der mit einer gewissen Subjektivität – bzgl. bevorzugter Themen des Autors – ausgewählt wurde. In der Einführung werden die Begriffe Wetter und Klima zueinander verortet. Einer generellen Betrachtung zur global gemittelten Temperatur – als Metrik um Aspekte des (atmosphärischen) Klimawandels zu beschreiben – folgt eine Illustration der Temperaturänderung der letzten Dekaden. Hier wird auch erklärt, wie ein kleines Änderungssignal vor dem Hintergrund eines großen Jahresgangs detektiert werden kann. Der klassische CO₂(Treibhausgas)-verursachte bodennahe (gemittelte) Temperaturanstieg wird dann von der globalen zur regionalen Erwärmung in Deutschland „verfolgt“. Abschließend wird eine Perspektive für das zukünftige Wetter und seine Relevanz für die Gesellschaft gegeben. Vor uns liegende Herausforderungen – inklusive Forschungsbedarf – werden zum Ende dieses Essays thematisiert.

1 Einführung

Die Klimaforschung ist heutzutage ein weites Feld. In diesem Essay wird es vor allem um eine atmosphärische Perspektive gehen, die den Bogen vom Wetter zum Klima und wieder zurück, zum zukünftigen Wetter im geänderten Klima, spannen wird. Dieser Überblick kann keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern soll weitere Fragen und Diskussionen stimulieren.

1.1 Wetter und Klima

Wetter und Klima werden oft nicht sauber getrennt. Gleichwohl sind eine sorgfältige Definition und Abgrenzung der beiden Begriffe unverzichtbar. Wetter ist das, was um uns herum in der Atmosphäre geschieht. Wir können seine Zustandsgrößen messen und erleben diese auch tagtäglich. Klima ist, ein wenig kongenial gesprochen, eine statistische Analyse des gewesenen Wetters und in der Zukunftsperspektive das sich kontinuierlich ändernde „Umfeld“ für das sich dann entwickelnde Wetter. Für Freunde von Differentialgleichungen kann man dies auch anders zusammenfassen. Möchte ich Wetter vorhersagen, benötige ich eine genaue Kenntnis des Anfangszustands (Wetter ist ein Anfangswertproblem/Initialwertproblem). Möchte ich Klima projizieren, wird der Anfangszustand unwichtiger – entscheidender werden dann Randwertentwicklungen (Klima ist also ein Randwertproblem). Natürlich sind sowohl Wetter als auch Klima nichtlinear und selbst bei präziser Kenntnis von Anfangszustand und Randwerten sind keine perfekten Vorhersagen und Projektionen möglich, denn selbst kleine Fehler können sich amplifizieren – und wer misst schon ohne Fehler oder kennt sogar den Energieverbrauch der Weltbevölkerung Jahre im

Voraus? Daher ist es sowohl für Wettervorhersagen als auch für Klimaprojektionen wichtig nicht nur in deterministischen Aussagen zu verharren, sondern auch Unsicherheiten zu kommunizieren. Bei der Wetter-App auf dem Handy findet das z. B. schon bei den Regenwahrscheinlichkeiten statt. Ab welcher Wahrscheinlichkeit nehmen sie einen Schirm mit? Sind sie eher risikofreundlich (erst ab 80 % Regenwahrscheinlichkeit) oder risikoavers (schon ab 20 % Regenwahrscheinlichkeit)? Beim Klima gibt es ein ähnliches Problem bezüglich der Unsicherheiten. Eine wichtige Randbedingung ist die Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre (dazu mehr im nächsten Abschnitt). Diese wichtige Kenngröße hängt aber von vielen Elementen im Klimasystem ab und nicht zuletzt vom Menschen selbst und wie wir uns zukünftig ernähren, heizen, wohnen und fortbewegen. So gibt es dann eine Unsicherheit bzgl. unserer Klimamodelle und ihrer Randwerte die unvermeidbar ist. Trotz allem können wir sinnvolle Szenarien annehmen und testen, um zu simulieren wie sich das Klima zukünftig ändern wird. IPCC und WMO/WCRP schaffen dafür saubere Rahmenbedingungen, in denen klar die Annahmen für die Simulationen erklärt sind und die Ergebnisse möglichst vollständig – und mit Unsicherheiten – diskutiert und zugänglich gemacht werden. National (in Deutschland) spielen natürlich auch Ressortforschungseinrichtungen (z. B. DWD und UBA) und universitäre (viele) und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen (z. B. MPG und Helmholtz) eine wichtige Rolle in der Klimaforschung (sowohl für die Beobachtungen als auch für die Modellierung und den damit verbundenen Vorhersagen und Projektionen).

1.2 Der Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt ist als Begriff vielen bekannt, und doch ist er irgendwie schwer greifbar. Wie können Gase, die nur in kleinen Beimengungen in der Luft (die wir atmen) enthalten sind, eine so große Wirkung haben? Dazu zunächst ein kleines Gedankenexperiment, welches auf grundlegender Physik beruht. Die Sonne scheint auf eine sich drehende Kugel (die Erde). Etwa 1368 W/m² Strahlungsflussdichte (SFD, umgangssprachlich auch Solarkonstante (S₀) genannte - obwohl die Zahl nicht ganz konstant ist) erreichen die Erde. Nur ¼ davon ist effektiv umsetzbar (das Verhältnis der Kugel zur projizierten Kreisfläche). Für eine erste Abschätzung der Temperatur auf einer idealisierten Erde (ohne wirksame Atmosphäre) kann man nun die effektiv eingehende SFD gleich der ausgehenden SFD eines schwarzen Körpers (unserer idealisierten Erde) setzen.

$$\frac{S_0}{4} = \sigma T^4 \tag{1}$$

Aus dieser Gleichung können wir nun die Gleichgewichtstemperatur unserer idealisierten Erde bestimmen.

$$T = \sqrt[4]{\frac{S_0}{4\sigma}} \tag{2}$$

Mit einem

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \tag{3}$$

ergibt sich dann eine Temperatur (T) von ca. 278 K oder ca. 5 °C. Also eine recht kalte Erde, denn wir beobachten ca. 15 °C als bodennahe (global gemittelte) Temperatur. Rechnen wir jetzt noch mit einer Albedo (α), also einer gewissen Reflexion von Strahlung, die dann nicht in Wärme umgesetzt wird, erhalten wir eine noch kältere Erde.

$$(1 - \alpha) \frac{S_0}{4} = \sigma T^4 \tag{4}$$

Für ein α = 0,3 ergibt sich dann eine Temperatur (T) von ca. 255 K oder ca. -18 °C. Somit wäre (unter der eigentlich realistischen Annahme einer Reflexion) die Erde sogar noch einmal deutlich kälter. Es gibt also noch weitere Effekte, die den Albedo Effekt überkompensieren. Diese können in der sogenannte Emissivität (ε) zusammengefasst werden, denn die Erde – mit ihrer komplexen Atmosphäre – ist eben kein perfekter schwarzer Körper.

$$(1 - \alpha) \frac{S_0}{4} = \epsilon \sigma T^4 \tag{5}$$

Für eine Emissivität ε = 0,74 ergibt sich dann eine Temperatur (T) von ca. 288 K oder ca. 15 °C, einem Wert der nahe an den Beobachtungen liegt. Aber was bestimmt nun diese Emissivität? Es sind vor allem auch die Treibhausgase in der Atmosphäre, und dabei in erster Linie das natürliche Treibhausgas Wasserdampf (H₂O), welches räumlich und zeitlich hoch

variabel ist. Weitere wichtige Anteile an dieser Emissivität haben aber auch Treibhausgase, die noch in viel kleineren Mengen vorhanden sind und im Fall von z. B. CO₂ keine hohe Variabilität (bezogen auf die mittlere Konzentration) aufweisen. Ähnliche Darstellungen der physikalischen Grundlagen finden sich in [1] und [2].

Tab. 1: (nach Buchal and Schönwiese [1]): Leicht idealisierte Übersicht zu den wichtigsten und bekanntesten Treibhausgasen. Obwohl die Konzentrationen gering sind, ist die Wirkung der Spurengase erheblich. Beim Wasserdampf (H₂O) ist die hohe räumliche und zeitliche Variabilität hervorzuheben. Beim CO₂ handelt es sich auch um ein natürliches Treibhausgas, aber sein starker Anstieg während der Industrialisierung ist menschengemacht und ohne unseren Einfluss wäre der Wert deutlich niedriger (ein gängiger Referenzwert ist 280 ppm).

| Molekül | Konzentration | Effektive Temperaturerhöhung | Relativer Beitrag zum Treibhauseffekt |
|------------------|----------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| H ₂ O | ~2,6 % | ~20 K | 60 % |
| CO ₂ | >400 ppm | ~9 K | 26 % |
| O ₃ | ~0.04 ppm (Bodennah) | ~2 K | 7 % |
| N ₂ O | ~0,32 ppm | ~1 K | 4 % |
| CH ₄ | ~1,8 ppm | ~1 K | 3 % |

Zu jedem der in Tabelle 1 aufgeführten Spurengase (und seiner Wirkung als Treibhausgas) könnte man einen eigenen Artikel verfassen – dies würde jedoch diesen Beitrag sprengen. Daher hier nur eine kurze Übersicht und eine kleine Vertiefung bzgl. des CO₂ und seiner zeitlichen Entwicklung.

Wasser (H₂O) ist eine wichtige Komponente des Erdsystems und wird durch die Atmosphäre effizient umverteilt. Gleichzeitig ist es das in Summe effektivste Treibhausgas - was aber in anderen Aggregatzuständen, z. B. flüssige Tröpfchen und Eiskristallen, die eine Wolke bilden oder als Schnee fallen, auch die Albedo vergrößern kann.

Ozon (O₃) ist ein besonders spannendes Gas. Das bodennahe Ozon (hier relevant) ist ein Schadstoff (also auch relevant bzgl. Luftreinhaltungsfragen) und Treibhausgas. Das Ozon in großen Höhen (dort gibt es wesentlich mehr, mit Werten mit bis zu ~10 ppm) ist die natürliche Sonnenbrille unserer Erde und schützt das Leben vor harter UV-Strahlung (siehe auch [5]).

Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) haben sowohl natürliche als auch anthropogene Quellen und sind trotz ihrer geringen Mengen wichtige Treibhausgase. Außerdem gibt es noch einen ganzen Zoo von weiteren Gasen, die wir hier nicht behandeln können.

Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist aber das bei weitem bekannteste Treibhausgas und mit großen anthropogenen Quellen, welche in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen sind. Die Messungen der atmosphärischen CO_2 Konzentrationen auf dem Mauna Loa sind in Abbildung 1 gezeigt. Natürlich ist die Konzentration in der Atmosphäre durch komplexe Quellen und Senken (Land/Vegetation und Ozean) bestimmt – daher ist auch ein Jahresgang in Abbildung 1 erkennbar (rote nicht geglättete Messreihe), aber der generelle Anstieg ist klar mit dem Verbrauch fossiler Brennstoffe verknüpft.

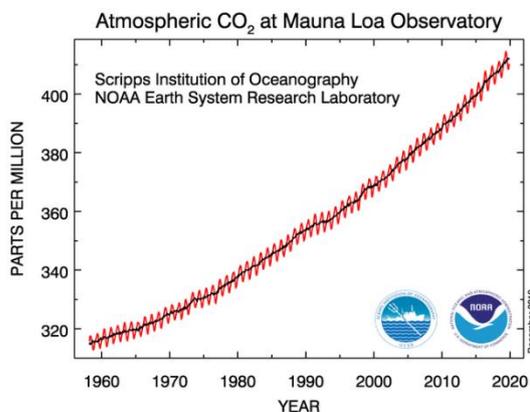


Abb. 1: Anstieg der CO_2 Konzentrationen in der Atmosphäre, gemessen auf dem Mauna Loa. Deutlich ist der kontinuierliche Anstieg von unter 320 ppm auf über 400 ppm von 1960 bis heute zu sehen – ein Anstieg um ca. 25 %. Quelle: [A]

2 Klimawandel vom Jahrhundert zum Jahrzehnt

In diesem Abschnitt soll es um einige Details des Klimawandels in den letzten Jahrhunderten und Jahrzehnten gehen. Wenn wir über den historischen Klimawandel sprechen, müssen wir stets den Kontext im Auge behalten. Das Klima der Erde hat auf geologischen Zeitskalen große Schwankungen durchgemacht – allerdings war es während der letzten 10000 Jahre relative beständig, was auch der Entwicklung des Menschen und seiner Hochkulturen zugutekam. Dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch auf Zeitskalen von Jahrhunderten und Dekaden erhebliche Schwankungen möglich sind. Allerdings geht es dann auch darum einen zugrundeliegenden Trend zu erkennen, der „physikalisch“ mit dem CO_2 -Anstieg verbunden werden kann.

2.1 Globaler Temperaturanstieg

Der globale bodennahe Temperaturanstieg der vergangenen Jahrzehnte ist ausführlich in der Literatur dokumentiert und auch noch bestehende Möglichkeiten diesen zu beschränken – siehe auch [3]. Kolleginnen und Kollegen haben dazu (historische) Thermometerzeitserien aufbereitet und bearbeitet und diese dann analysiert (und auch gemittelt) – inklusive einer Betrachtung von Unsicherheiten. Außerdem gab und gibt es große Anstrengungen sogenannte Re-Analysen anzufertigen, die historische Messungen mit aktuellen Wettermodellen verbinden und so globale (lückenlose) Analysen zulassen. Auch diese Analysen sind nicht ohne Probleme und Herausforderungen, dennoch zeigen alle Methoden ein ähnliches Bild der globalen Erwärmung (der bodennahen Temperatur) für die letzten Jahrzehnte.

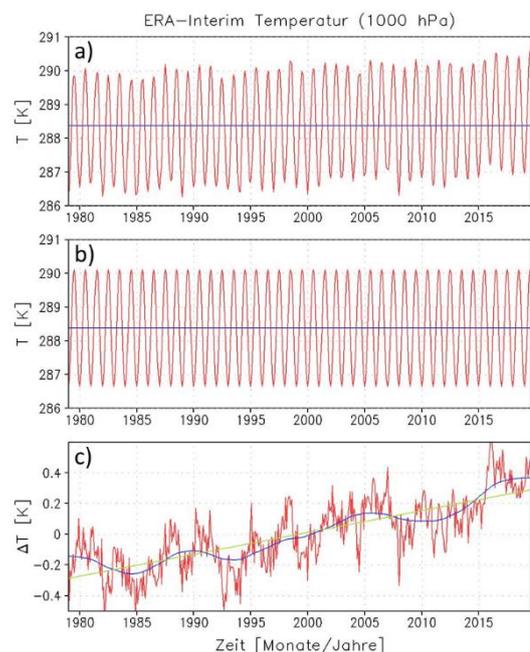


Abb. 2: Analyse der bodennahen global gemittelten Temperatur – Re-Analyse Daten sind lückenlos vorhanden – hier ERA-Interim. Quelle: [B]

Die in Abbildung 2 verwendeten Daten werden mit einem Modell des ECMWF erzeugt, welches Beobachtungsdaten assimiliert (Assimilation beschreibt hier den Vorgang, dass ein Vorhersagemodell durch Beobachtungsdaten „geführt“ wird). Dadurch lassen sich einfach globale Mittel der (bodennahen) Temperatur berechnen. Panel a zeigt die global gemittelte Temperatur in 1000 hPa (in der Meteorologie wird der Druck oft als vertikale Koordinate genutzt; er nimmt exponentiell nach oben hin ab). Deutlich ist der Jahresgang zu erkennen (im langjährigen Mittel ergibt sich ein Wert von 288,4 K, siehe oben). Panel b

zeigt den mittleren Jahresgang, der sich aus allen Jahren ergibt (dieser wird für jedes Jahr wiederholt). Panel c zeigt dann die Differenz (in rot) zwischen den Temperaturdaten in Panel a und dem (sich jährlich wiederholenden) mittleren Jahresgang in Panel b. Deutlich zeigt sich dann eine hohe zwischenjährliche Variabilität, die sich aber gut (durch eine Mittelung) dämpfen lässt. In diesem Beispiel durch die zweifache Anwendung eines gleitenden Mittels von plus/minus 24 Monaten (in blau). Natürlich lässt sich nun auch ein linearer Trend ausrechnen (in grün), der klar die generelle Erwärmung der bodennahen Temperatur zeigt. Hier ergibt sich ein Wert von 0,14 K/Dekade. Literaturwerte können davon abweichen, da sie direkt aus Stationsdaten abgeleitet werden oder andere Methoden zur Trendberechnung verwenden.

Ein weiteres Indiz dafür, dass die Erwärmung am Boden auf Treibhausgase zurückzuführen ist, liefert uns die fundamentale Physik des Strahlungstransports. Wir können berechnen, dass die bodennahe Erwärmung mit einer Abkühlung in höheren Schichten einhergehen muss. Sowohl einzelne Stationen als auch die bereits eingeführten Re-Analysedaten zeigen dies. Dies verdeutlicht Abbildung 3, die im oberen Teil (Panel a) die Abkühlung in der Stratosphäre zeigt (10 hPa, etwas oberhalb von 30 km).

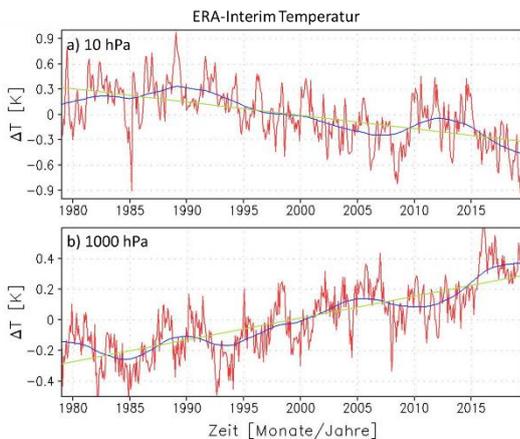


Abb. 3: Panel b entspricht dem Resultat aus Abbildung 1 (Panel c). Panel a basiert ebenfalls auf ERA-Interim Daten, allerdings wird hier die Temperatur in der Stratosphäre (in 10 hPa, etwas oberhalb von 30 km) analysiert. Die Analyseschritte entsprechen denen, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

2.2 Temperaturanstieg in Deutschland

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, setzt sich das globale Bild aus unzähligen lokalen Messungen zusammen. Natürlich ist die globale Aussage als eine Metrik oder Maßzahl wichtig, aber als Menschen leben wir in unseren Regionen und sind lokalen Änderungen ausgesetzt. Daher ist es auch wichtig,

regionale Veränderung separat zu betrachten. Eine der längsten Thermometer-Temperaturzeitserien gibt es in Deutschland am heutigen DWD Observatorium Hohenpeißenberg (Quelle [C]). Dort werden seit dem späten 18. Jahrhundert meteorologische Beobachtungen durchgeführt. Auch diese Zeitserie zeigt eine klare Erwärmung, deren Verlauf in Abbildung 4 dargestellt ist. In den Jahren seit 1960 ist die bodennahe Jahresmitteltemperatur mit einem Trend (hier 0,4 K/Dekade, Panel b), der deutlich über dem Trend der geglätteten global gemittelten Monatsmitteltemperatur liegt, angestiegen.

Hier soll auch darauf verwiesen werden, dass alle hier verwendeten Daten frei und ohne Beschränkungen zugänglich sind. Somit kann sie jeder selbst herunterladen und diese Zeitserien analysieren. Stationsdaten für Deutschland können über den DWD Datendienst abgerufen werden. ERA-Interim Daten sind über ein Web API erhältlich (siehe Links unter Datenquellen).

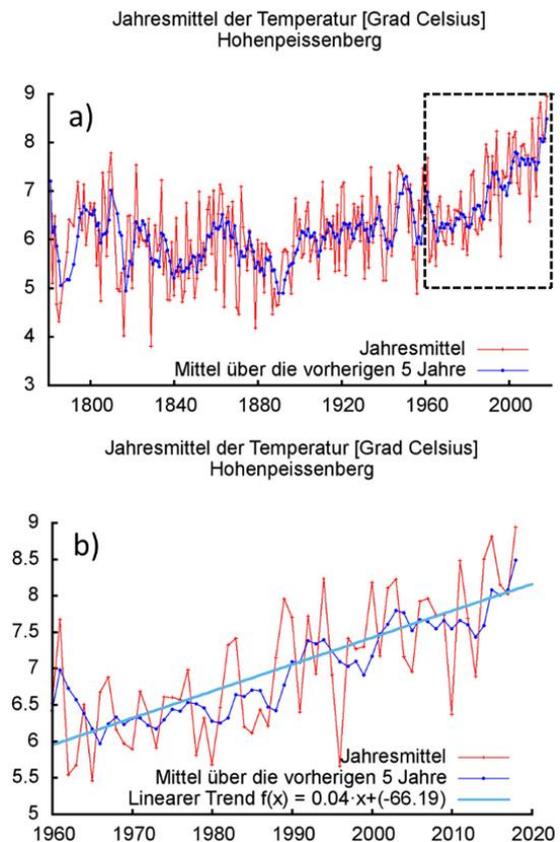


Abb. 4: Analyse der Jahresmitteltemperaturen vom Hohenpeißenberg in Bayern (Quelle: [C]). In Panel a ist die gesamte verfügbare / historische Zeitreihe gezeigt. Panel b fokussiert sich auf die Jahre seit 1960. Für diesen Zeitraum liegt auch die bekannte CO₂ Zeitserie vom Mauna Loa Observatorium vor (Abbildung 1).

3 Klimawandel in den kommenden Jahrzehnten

Was erwartet uns in der Zukunft? Eine Frage, die uns generell bewegt und die wichtige Konsequenzen für unsere Planungen hat. Wie bereits erwähnt, bedeutet ein weiterer Anstieg der Treibhausgase eine weitere Erhöhung der bodennahen Temperaturen – einfache Physik. Eine genaue Projektion dieser Erhöhung ist aber trotzdem schwierig und wir benötigen umfangreiche Modellsysteme dafür, die viele verschiedene physikalische Prozesse über diverse Skalen hinweg gut abbilden können. Die zu bewertenden Szenarien und die verwendete Modellkomplexität müssen „intelligent“ gewählt werden, um aussagekräftige Simulation / Projektionen durchführen zu können.

- **Szenarien:** Wir müssen Annahmen darüber machen, wie sich unser Energiemix in der Zukunft entwickeln wird. Wie viele Menschen werden wie heizen, sich fortbewegen und sich ernähren? Was bedeutet das dann für viele Faktoren im Klimasystem (wie zum Beispiel auch Landnutzung) und schlussendlich für den Anstieg von Treibhausgasen in der Atmosphäre? (Andere Umweltprobleme wie Einschränkungen der Artenvielfalt und Ozeanversauerung blenden wir nun schon aus ...)
- **Modellkomplexität:** Wie entwickeln sich die Rückkopplungen im Klimasystem? Wenn es wärmer wird haben wir wahrscheinlich mehr Wasserdampf in der Luft, dies könnte zu mehr Wolken führen, einem Anstieg der Albedo und einer kleinen Abkühlung, die der Erwärmung entgegenwirkt. Allerdings verringern höhere Temperaturen Gletscher und Eisschilde, deren Abschmelzen eine niedrigere Albedo hinterlässt und dem davor genannten Effekt entgegenwirkt. Dies sind nur zwei einfache Beispiele von komplexeren Rückkopplungen im atmosphärischen Klimasystem die zwar in Modellen berücksichtigt werden, die aber dazu führen, dass sich Unsicherheiten vergrößern.

Um Unsicherheiten besser abbilden zu können, werden Projektionen des zukünftigen Klimas (inklusive der bodennahen Temperaturen) von unterschiedlichen internationalen Modellsystemen für unterschiedliche Szenarien mehrfach durchgeführt. Mit dieser Vielfalt erreicht man dann eine Abdeckung verschiedener zukünftiger Entwicklungen, die man dann gegeneinander abwägen kann. Auch hier spielt das IPCC eine koordinierende Rolle.

4 Perspektiven für zukünftiges Wetter

Wie schon am Anfang angesprochen ist (atmosphärisches) Klima in gewisser Weise die Statistik des Wetters. Wenn wir also Modelle (und Daten) in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung betrachten (und nicht nur wie oben beschrieben in Mitteln und deren

langzeitlichen Änderungen – obwohl es auch dafür gute Gründe gibt), dann können wir unsere Klimaprojektion auch als einen „Simulator/Generator“ zum Betrachten des künftigen Wettergeschehens begreifen. Womit wir wieder bei den Regionen und den lokalen Manifestationen des Klimawandels wären. Niemand erlebt eine „gemittelte Temperatur“. Obwohl diese Mittel eine wichtige Metrik zur Beschreibung des allgemeinen Klimawandels sind, sind diese Größen nicht für uns erlebbar. Allerdings erleben wir sehr extremes Wetter und seine Folgen (auch in dem Sinne, dass wir uns gut an diese Ereignisse erinnern): Starkregen, Stürme, Gewitter, Hitzewellen und vieles mehr. Hitzewellen und der Mangel an Niederschlag können natürlich auch zu bedrohlichen Dürren führen – und damit z. B. zu Ernteausfällen. Natürlich können wir das Wetter für z. B. das Jahr 2060 nicht voraussagen, wir können aber die sich ändernden Statistiken und Charakteristiken von Extremen studieren und uns somit informieren was auf uns zukommt.

4.1 Relevanz für die Gesellschaft

Wetter und seine Extreme sind selbstverständlich relevant für unser Leben. Schon seit Anbeginn unserer Existenz hängen wir vom Wetter und den damit verbundenen Konsequenzen bezüglich der Nahrungsmittelversorgung ab. Die Entwicklung von Hochkulturen waren dem Wettergeschehen unterworfen und wenn sich dieses änderte, hatte dies auch große Konsequenzen für die Menschen. Ein prominentes Beispiel ist dafür sicherlich auch das Nil Hochwasser im alten Ägypten. Aber auch heute noch beeinflusst das Wetter unsere Entscheidungen. Sei es nur der morgendliche Blick auf die Wettervorhersage als Entscheidungshilfe für die Bekleidung, oder für die Planung von Freizeitaktivitäten. Natürlich – und wohl viel wichtiger – ist aber auch das Zusammenspiel von eintretenden Extremen (hoffentlich rechtzeitig vorhergesagt) und Erhalt und Betrieb von Infrastrukturen. Beim starken Regen das Management des Abwassers, um Überschwemmungen zu vermeiden, bei stark eingeschneiten Straßen und Schienen das Räumen des Schnees, um einen reibungslosen Straßen- und Schienenverkehr zu ermöglichen, und natürlich gibt es viele weitere Beispiele.

Für eine Klimawissenschaft, die in den Regionen zuhause ist und die Helmholtz-Zentren in verschiedenen Regionen und über diverse Spezialisierung hinweg verbindet, steht auch die regionale Klimainitiative REKLIM (www.reklim.de). Im Netzwerk dieser Klimainitiative wird nicht nur geforscht, sondern auch aktiv mit den Bürgerinnen und Bürgern kommuniziert. Dies geschieht nicht nur in großen internationalen Konferenzen und ihrem Begleitmaterial (z. B. REKLIM 2019 [4]), sondern auch in kleineren Regionalkonferenzen, die sich mit den Problemen und Fragestellungen einer bestimmten Region beschäftigen.

In jedem Jahr ist diese Veranstaltung in einer anderen Region in Deutschland zu Gast (siehe auch <https://www.reklim.de/aktuelles-und-aktivitaeten/reklim-veranstaltungen/>) und beschäftigt sich dort mit den lokalen Herausforderungen. Es soll nicht verschwiegen werden, dass es natürlich auch weitere Initiativen in und außerhalb von Helmholtz gibt.

4.2 Relevanz für die Baubranche

Diese allgemeine Relevanz für die Gesellschaft gilt natürlich auch für die Baubranche. Fragestellungen, die dabei auch schon im REKLIM Kontext betrachtet wurden, betrafen vor allem Starkniederschläge und entsprechende Planungen für die effiziente Entwässerung. Aber wenn wir an mögliche Überflutungen denken, ist auch ganz klar, dass die Frage, wo was gebaut werden darf, zentral sein kann. Wenn diese Frage geklärt ist und ein Bauvorhaben begonnen wird, ist natürlich der Bau selbst sehr vom Wetter abhängig und eine gute Bauleitung wird natürlich auch immer einen Blick auf die Wettervorhersage haben (mal mit größerem und mal mit kleinerem Erfolg - wie jeder bestätigen kann, der auch schon einmal selbst (mit) gebaut hat). Je nach den Arbeiten und verwendeten Baustoffen sind natürlich unterschiedliche Zielgrößen wichtig.

Basierend auf <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/eigenschaften/temperaturen-und-wetterabhaengigkeiten-150946> (letzter Zugriff 16.12.19) soll hier ein kleiner Blick auf den Beton das Bild abrunden. Auch hier ist das Wetter eine wichtige Randbedingung für das Verarbeiten von Beton im Außenbereich. Der „Wohlfühlbereich“ liegt dabei zwischen +5 °C und +30 °C. Für Baustellen und Transportbeton ist dieser Temperaturbereich durch DIN 1045-3 mandatiert. Unterschiedliche zusätzliche Wetterparameter tangieren dabei die Qualität der resultierenden Betonstruktur. **Regen** kann den Wasserzementwert erhöhen und verschlechtert damit die Struktur und das Gefüge des Betons. Im Gegensatz dazu führt **Hitze** zum zu schnellen und ungleichmäßigen Abbinden. **Frost** und **Kälte** verursachen diverse Probleme, bis hin zur Bildung von Eiskristallen, die die Struktur lockern und sprengen. **Wind** beeinflusst ebenfalls die Verdunstung und damit auch die Geschwindigkeit des Austrocknens. All die genannten Parameter werden sich unter Klimawandel ändern und besonders die Häufigkeit und Ausprägung ihrer Extreme in verschiedenen Regionen.

Natürlich kommt erschwerend hinzu, dass Planungsvorläufe und Vorhersagbarkeit nicht immer gut aufeinander abgestimmt sein können. Die Vorhersagbarkeit der Temperaturbereiche auf Zeitskalen von mehreren Tagen ist dabei wohl meist nicht das Problem, aber Regenvorhersagen haben potenziell größere Unsicherheiten. Natürlich spielt dabei der Klimawandel auch eine Rolle, denn mit generell höheren

Temperaturen wird auch mit einer größeren Wahrscheinlichkeit z. B. die 30 °C Marke häufiger „gerissen“. Dies könnte heißen, dass die Anzahl der Tage im Sommer an denen Beton im Außenbereich problemlos verarbeitet werden kann, kleiner wird. Um hier zu verlässige Änderungen prognostizieren zu können, bedarf es eines Nutzerdialogs (für die richtigen Diagnostiken) und (noch) besserer Modelle.

5 Forschungsbedarf in der Klimaforschung

Natürlich, wie in allen Naturwissenschaften, benötigen wir ein immer weiter verbessertes Prozessverständnis, um dieses dann in Modelle zu implementieren (umsetzen zu können), die wir dann für Vorhersagen (Wetter auf verschiedenen Zeitskalen) und Projektionen (auf klimatologischen Zeithorizonten) nutzen können. Der Übergang von Wettervorhersagen zu Klimaprojektionen wird dabei immer fließender (Übergang von Anfangswert- zu Randwertproblemen). Das bedeutet auch, dass räumliche Skalen „nahtlos“ (im Englischen wird der Begriff „seamless“ verwendet) miteinander interagieren können müssen. Hier werden zurzeit in der Modellierung große Fortschritte gemacht, aber es gibt auch noch weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um wirklich ein über (fast alle) Skalen „nahtloses“ Modell für möglichst viele Anwendungen zu konzipieren. Hinzu kommt die große Rolle der Luftzusammensetzung und ihre komplexe Interaktion mit der thermischen Struktur der Atmosphäre. Ein einfaches Beispiel dafür ist die gut verstandene Erwärmung der bodennahen Luftschicht, wenn sich das CO₂ erhöht. Ein weiteres bekanntes Beispiel ist die Rolle des stratosphärischen Ozons, welches die vertikale Temperaturstruktur der Stratosphäre bestimmt. Zusätzlich ist aber der Übergang zwischen Troposphäre (dem untersten Atmosphärenstockwerk) zur Stratosphäre (dem darüber liegenden Stockwerk) wichtig für die sogenannte Klimasensitivität. Die Klimasensitivität gibt an, wie stark sich die bodennahen Luftschichten erwärmen, wenn sich das CO₂ in der Atmosphäre verdoppelt. Dieser Wert wird durch unterschiedliche Rückkopplungen beeinflusst, wie z. B., wie sich der Wassergehalt und die Wolken in der Atmosphäre ändern, aber eben auch, wie sich der Übergang zwischen Troposphäre und Stratosphäre verhalten wird - und dort spielt auch das stratosphärische Ozon eine wichtige Rolle [5].

Diese zahlreichen Rückkopplungen mit modernen „nahtlosen“ Modellsystemen weiter zu untersuchen und Unsicherheiten zu charakterisieren, wird viele Klimaforscher in den nächsten Jahren beschäftigen. Wichtig ist dann auch in der Kommunikation der Klimaprojektionen klar zu erklären, dass Unsicherheiten nicht „kein Wissen“ bedeuten, sondern das gut

quantifizierte Unsicherheiten auch wichtige Entscheidungsgrundlagen liefern können. Natürlich werden zentrale Antworten auf wichtige Fragen gesucht: Wie groß ist die Klimasensitivität und wie können wir noch bessere Klimaprojektionen erzielen? Dies ist wichtig, wenn es zum Beispiel um die Einhaltung von Schwellwerten geht, wie z. B. dem 1,5 °C Ziel [3] bei der Beschränkung der globalen Erwärmung. Wie werden sich Wetterextreme im zukünftigen Klima ändern? Wie können wir die Wetterextreme zukünftig noch besser vorhersagen?

Mit neuen und verbesserten Beobachtungssystemen, Modellen und Datenanalysetechniken (inklusive Datenassimilation und „big data analytics“) werden wir neue Pakete schnüren können, die uns bessere Projektionen und Vorhersagen ermöglichen werden. Zusätzlich müssen wir aber auch in die Kommunikation investieren, um unsere Ergebnisse in Produkte zu verwandeln, die von den Menschen verstanden werden. Es gibt viel zu tun und eine produktive Zukunft liegt vor uns – als Klimawissenschaftler und als Nutzer von Klimainformationen.

6 Literatur

[1] Buchal, C. and Schönwiese, C. D.: KLIMA Die Erde und ihre Atmosphäre in Wandel der Zeiten (<https://e-pic.awi.de/id/eprint/35183/>), Jülich/Frankfurt, Heraeus-Stiftung, Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, 2010.

[2] Goose, Hugues: Climate System Dynamics, Cambridge University Press, ISBN: 9781107445833, 2015.

[3] IPCC 2018: IPCC Special Report Global Warming of 1.5°C: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

[4] REKLIM 2019: REKLIM Magazin "Klimawandel vor unserer Haustür": <https://www.reklim.de/magazin/>

[5] WMO 2018: WMO UN Environment Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2018/>

7 Bild- und Datennachweis

[A] CO₂ Zeitreihe vom Mauna Loa: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> (initiiert wurden die Messungen von Charles David Keeling (1928-2005), daher wird auch manchmal der Begriff Keeling-Kurve für diese Darstellung verwendet)

[B] ERA-Interim Daten: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (asimilierter meteorologischer Datensatz des ECMWF – ein neueres Produkt löst diesen Datensatz nun ab)

[C] Hohenpeißenberger (DWD OHP) Temperaturreihe: <https://cdc.dwd.de/portal/> (das Auffinden und

Auswählen der Daten basiert zunächst auf der Auswahl der Station in der Datenbank, hier dem DWD Observatorium Hohenpeißenberg)

8 Abkürzungen

DWD: Deutscher Wetterdienst, <https://www.dwd.de/>

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://www.ecmwf.int/>

IPCC: The Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/>

REKLIM: Helmholtz-Klimainitiative Regionale Klimaänderungen, <https://www.reklim.de/>

UBA: Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/>

WCRP: World Climate Research Program, <https://www.wcrp-climate.org/>

WMO: World Meteorological Organization, <https://public.wmo.int/>

Autor

Prof. Dr. Peter Braesicke

Institut für Meteorologie und Klimaforschung
Karlsruher Institut für Technologie
H.-v.-Helmholtz-Platz 1
76344 Leopoldshafen