

Klimawandel in den Alpen: Warum steigen die Temperaturen dort so stark?

von Ben Marzeion

Keywords: Klimawandel, regionale Erwärmung

Während der Klimawandel auf globaler Ebene gut verstanden ist und Projektionen für die Zukunft relativ geringe Unsicherheiten aufweisen, bestehen auf regionaler Ebene große Lücken im Verständnis und große Unsicherheiten in den Projektionen. So hat sich der Alpenraum im vergangenen Jahrhundert deutlich stärker erwärmt als die Erde insgesamt – es ist aber weder klar, woran das liegt, noch wie es weitergehen wird. Um die richtigen Entscheidungen für die Zukunft zu treffen, brauchen wir aber gerade Informationen über die Entwicklung auf regionaler und lokaler Ebene.

Der Erfolg von demokratischen Entscheidungen ist davon abhängig, wie gut die Wahlberechtigten über die Auswirkungen ihrer unterschiedlichen Wahlmöglichkeiten informiert sind. Ohne ein gutes Verständnis der Auswirkungen ihrer Wahlentscheidung können sie nicht die Option auswählen, die im Ergebnis ihren Wünschen am nächsten kommt. Wenn es um Entscheidungen geht, deren Auswirkungen von Naturgesetzen abhängen, ist es daher die Aufgabe der Wissenschaft, die Öffentlichkeit über Folgen der unterschiedlichen Optionen zu informieren (PIELKE 2011). Wenn es um den globalen Klimawandel geht, haben die Vereinten Nationen zu diesem Zweck das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) eingesetzt: Basierend auf unterschiedlichen Szenarien zur gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung der Welt werden die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf das Weltklima bestimmt. Damit besteht auf globaler Ebene die Möglichkeit, politische Entscheidungen (auch danach auszurichten, welche Auswirkungen sie auf die klimatische Entwicklung haben werden.

Dabei besteht auf globaler Ebene nur relativ geringe Unsicherheit, wie die Klimaänderung vom menschlichen Verhalten abhängt: durch eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre verringert sich die Abstrahlung der Erde im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums, während die Einstrahlung im Bereich des sichtbaren Lichts in erster Näherung konstant bleibt.¹ Damit entsteht ein Ungleichgewicht der planetaren Energiebilanz: Mehr Energie gelangt ins Erdsystem als wieder ins All zurückgestrahlt wird; Energie akkumuliert sich im Erdsystem.² Da dieser globale Treib-

¹Durch Änderungen der Schneebedeckung, Meereis, Bewölkung, Sonnenaktivität etc. verändert sich auch die Einstrahlung. Diese Effekte werden in Klimamodellen selbstverständlich berücksichtigt und sollen hier nur der Einfachheit halber vernachlässigt werden. Gleiches gilt im Bereich der infraroten Abstrahlung z.B. durch Veränderungen der Wasserdampfkonzentration.

²Diese Akkumulation von Energie wird dadurch beendet, dass sich mit der daraus folgenden Erwärmung der Atmosphäre auch die infrarote Abstrahlung wieder erhöht.

hauseffekt durch einfache und lang bekannte physikalische Gesetze bestimmt wird, hat seit seiner ersten Beschreibung durch ARRHENIUS (1896) auch die Einführung komplexer Klimamodelle nur wenig an der Abschätzung seiner Stärke verändert. Auf globaler Ebene ist damit eindeutig, dass aus einer Erhöhung der Treibhausgaskonzentration eine Erwärmung folgen wird.³ Den Auswirkungen dieser Erwärmung wird aber auf lokaler und regionaler Ebene begegnet werden müssen, und dort ist die Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung viel größer. Woran liegt das?

Die Energie, die sich durch den Treibhauseffekt im Erdsystem akkumuliert, verteilt sich sehr ungleichmäßig auf unterschiedliche Komponenten des Erdsystems. Abb. 1 zeigt die Verteilung der zwischen 1955 und 1998 im Erdsystem akkumulierten Energie: Der weitaus größte Teil der Energie (über 4/5) ging in die Erwärmung der Ozeane, jeweils etwa 1/20 wurden durch die Erwärmung der Lithosphäre und das Abschmelzen von Landeis (d.h., Gletschern und den Eisschilden in Grönland und der Antarktis) verbraucht, und ebenfalls etwa 1/20 der Energie diente zur Erwärmung der Atmosphäre. Das bedeutet, dass wir nur etwa 1/20 des Treibhauseffektes messen, wenn wir nur auf die Lufttemperatur schauen – die tatsächlichen Auswirkungen der Treibhausgase sind viel größer. Der Grund dafür liegt zum einen in der großen Masse der Ozeane (ca. $1,4 \cdot 10^{21}$ kg, die Atmosphäre wiegt nur ca. $5,1 \cdot 10^{18}$ kg = 3,6 Tausendstel), zum anderen aber auch an der etwa 4-mal höheren spezifischen Wärmekapazität von Wasser. Es ist also viel mehr Energie nötig, um die Ozeane aufzuheizen, als um die Atmosphäre

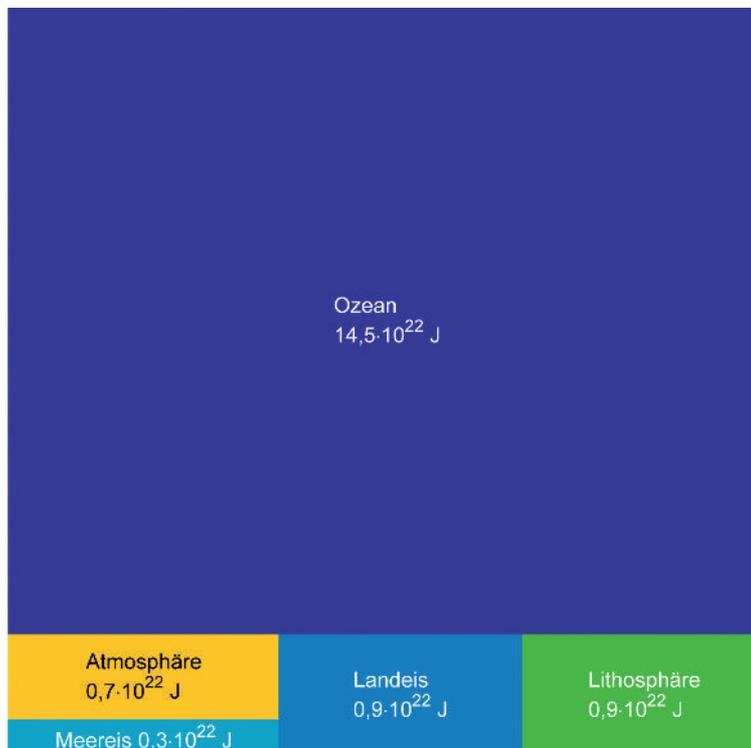


Abb. 1: Akkumuliertes planetares Energiebudget der Erde zwischen 1955 und 1998 (Daten aus LEVITUS et al., 2005). Insgesamt hat der Planet Erde in diesem Zeitraum ca. $17,3 \cdot 10^{22}$ J Energie aufgenommen⁴, der weitaus größte Anteil daraus ist in die Erwärmung der Ozeane gegangen. Weitere große Energiemengen wurden für die Erwärmung der Lithosphäre und das Schmelzen von Eis verbraucht. Nur etwa 5% der akkumulierten Energie spiegeln sich in der Erwärmung der Atmosphäre wieder.

³Aufgrund der Trägheit des Klimasystems würde diese Erwärmung auch dann zunächst weitergehen, wenn keine weiteren Treibhausgase emittiert würden. Eine Anpassung wird also unabhängig von zukünftigen Entscheidungen notwendig sein.

⁴Diese Energiemenge entspricht in etwa dem 34-fachen globalen Energiebedarf der Menschheit im Jahr 2007.

aufzuheizen. Gleichzeitig bedeutet es, dass relativ geringfügige Umstellungen der Energieflüsse innerhalb des Erdsystems relativ große Auswirkungen auf die Lufttemperatur haben können – eindrückliches Beispiel hierfür ist El Niño: bei der etwa alle 4-7 Jahre auftretenden Erwärmung des tropischen Pazifiks gehen große Mengen Energie aus dem Ozean in die Atmosphäre über, was zu weitreichenden Umstellungen der globalen Zirkulation der Atmosphäre führt. Befindet man sich innerhalb des Erdsystems und interessiert sich für die Auswirkungen der globalen Erwärmung in einer bestimmten Region, ist es daher ungleich schwieriger zu eindeutigen Ergebnissen zu kommen.

Die Alpen sind ein gutes Beispiel für diese Problematik. Im oberen Teil der Abb. 2 ist die Temperaturanomalie des Alpenraumes von 1900 bis 2003 dargestellt.⁵ Es zeigt sich zum einen eine recht aus-

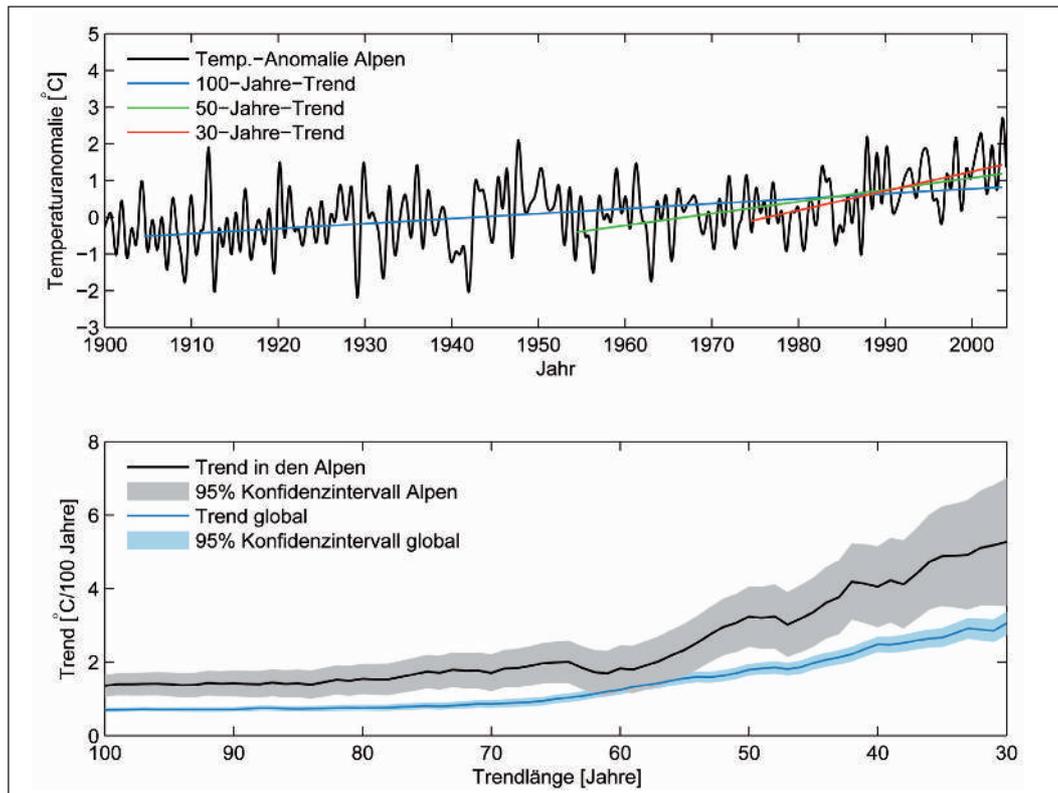


Abb. 2: Oben: Temperaturanomalien im Alpenraum seit 1900, relativ zum Temperaturmittel zwischen 1961 und 1990 (Daten aus AUER et al., 2007). Die farbigen Linien geben den linearen Temperaturtrend berechnet über die letzten 30, 50, und 100 Jahre wieder. Unten: linearer Trend der Temperaturen im Alpenraum (schwarz) und auf allen Landflächen der Erde (blau, Daten aus MITCHELL & JONES 2005), in Abhängigkeit von der Länge der Trendberechnung. D.h., die Steigung der blauen Linie im oberen Teil der Abbildung entspricht dem Wert der schwarzen Linie im unteren Teil der Abbildung bei 100 Jahren, die Steigung der grünen Linie (oben) dem Wert bei 50 Jahren (unten), und die Steigung der roten Linie (oben) dem Wert bei 30 Jahren (unten). Die Alpen folgen dem globalen Muster einer sich beschleunigenden Erwärmung, erwärmen sich aber über fast jeden Zeitraum gesehen signifikant schneller als die Welt insgesamt.

⁵Leider liegt der Datensatz nur bis 2003 vor, aus globalen Daten ist aber klar ersichtlich, dass sich in den vergangenen 8 Jahren der langfristige Erwärmungstrend fortgesetzt hat.

geprägte Klimavariabilität, d.h. von einem Jahr zum nächsten gibt es durchaus große Temperaturunterschiede, die genau den oben beschriebenen Veränderungen der Energietransporte innerhalb des Erdsystems zuzuschreiben sind. Darüber hinaus zeigt sich aber auch ein langfristiger Trend zu wärmeren Temperaturen. Bestimmt man diesen Trend über die letzten 30 Jahre, so ist er größer, als wenn man ihn über die letzten 50 oder 100 Jahre bestimmt – die Erwärmung beschleunigt sich also (farbige Linien). Im unteren Teil der Abbildung 2 ist die Stärke des Trends in Abhängigkeit der Zahl der Jahre, über die er bestimmt wurde, dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Beschleunigung der Erwärmung systematisch ist. Vor allem aber erkennt man, dass der Alpenraum sich im Vergleich mit dem globalen Mittel signifikant stärker erwärmt – und dies nicht nur in den letzten Jahren, sondern unabhängig davon, wie lang der betrachtete Zeitraum ist.

Aus dieser Beobachtung ergibt sich eine Reihe von Fragen: Warum ist die Erwärmung in den Alpen systematisch stärker? Wird diese stärkere Erwärmung in Zukunft weitergehen? Gibt es ähnliche Effekte in anderen Gebirgen der Welt, oder handelt es sich um eine regionale Besonderheit? Die Beantwortung dieser Fragen ist von großer Bedeutung, will man sich auf die Zukunft einstellen. Ohne ein Verständnis der Ursachen ist es sowohl denkbar, dass die verstärkte Erwärmung in der Zukunft weitergeht, als auch dass es sich um ein zeitlich begrenztes Phänomen handelt, der Alpenraum sich womöglich in den nächsten Jahrzehnten abkühlt, um irgendwann von der globalen Erwärmung wieder eingeholt zu werden und sich dann wieder zu erwärmen.

Es kommen einige, aber letztlich doch eine begrenzte Anzahl an möglichen Ursachen in Frage, wenn man das Phänomen wiederum aus dem Blickwinkel des Energietransports betrachtet. Die verstärkte Erwärmung der Alpen bedeutet, dass mehr Energie in die Atmosphäre im Alpenraum hineintransportiert wurde, als wieder heraus transportiert wurde. Anders als bei der globalen Energiebilanz kann dieser Transport nun auch auf anderem Wege als über die Strahlung erfolgen:

1. Es ist denkbar, dass durch eine Umstellung der Zirkulation mehr warme Luft in den Alpenraum strömt. Diese Umstellung könnte sowohl dauerhaft als auch temporär sein.
2. Auch ein Transport von mehr Feuchtigkeit kann zu einer Erwärmung führen: Für die Verdampfung von Wasser ist Energie notwendig, die bei Kondensation wieder frei wird. Dieser Mechanismus kommt als Erklärung der Erwärmung also nur dann in Frage, wenn entweder gleichzeitig der Niederschlag und/oder die Wolkenbildung zugenommen haben.
3. Wenn weniger infrarote Strahlung durch die Atmosphäre nach oben dringt, würde dies zu einer Erwärmung führen – auch hier spielt wieder der Wassergehalt der Atmosphäre (sowohl in gasförmiger als auch kondensierter Form) eine wichtige Rolle⁶.
4. Wenn mehr Strahlung im sichtbaren Bereich des Lichts durch die Atmosphäre dringt und nicht reflektiert wird, würde dies zu einer Erwärmung führen. Hierbei spielen auch wieder Wolken eine wichtige Rolle – allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen, da eine stärkere Bewölkung zu stärkerer Reflektion, und damit weniger absorbiertes Strahlung führt; in den Alpen kommt darüber hinaus eine Abnahme der Schneedecke in Frage, was zu einem dunkleren Untergrund, damit weniger Reflektion und mehr Absorption führen würde.
5. Schließlich ist es auch noch denkbar, dass eine vertikale Umverteilung innerhalb der Luftsäule zur

⁶Natürlich sind auch die anthropogenen Treibhausgase von Bedeutung – diese haben aber in den Alpen keine stärkere Konzentration als im globalen Mittel, und können daher den Unterschied nicht erklären.

beobachteten Erwärmung führt. Eine Destabilisierung der Schichtung, d.h. eine Erwärmung der unteren Luftschichten bei Abkühlung der oberen Luftschichten würde ebenfalls zu höheren (in Bodennähe gemessenen) Temperaturen beitragen. Dies ist aber nur fallweise möglich – nämlich dann, wenn die Schichtung vorher stabil (unten kälter als oben) war: eine dauernde Erwärmung der tiefen Luftschichten bei Abkühlung der oberen Luftschichten würde dazu führen, dass durch Konvektion die Wärme von unten wieder nach oben gebracht wird.

Es lässt sich mit dem momentanen Wissenstand nicht beantworten, welche dieser möglichen Ursachen für die starke Erwärmung verantwortlich sind. Es gibt aber zumindest Indizien, die eine Ursache wahrscheinlich, und eine andere unwahrscheinlich erscheinen lassen: In den Alpen treten stabile Schichtungen häufig in den Wintermonaten auf. Dementsprechend ist in den Wintermonaten das Potential des unter Punkt 5 genannten Mechanismus am größten. Abb. 3 zeigt den linearen, 30-jährigen Erwärmungstrend in den Alpen aufgeschlüsselt nach Monaten und es wird deutlich, dass im Winter die Erwärmung in den Alpen keineswegs signifikant stärker ist als im globalen Mittel. Damit ist es recht unwahrscheinlich, dass dieser Mechanismus für die starke Erwärmung verantwortlich ist.

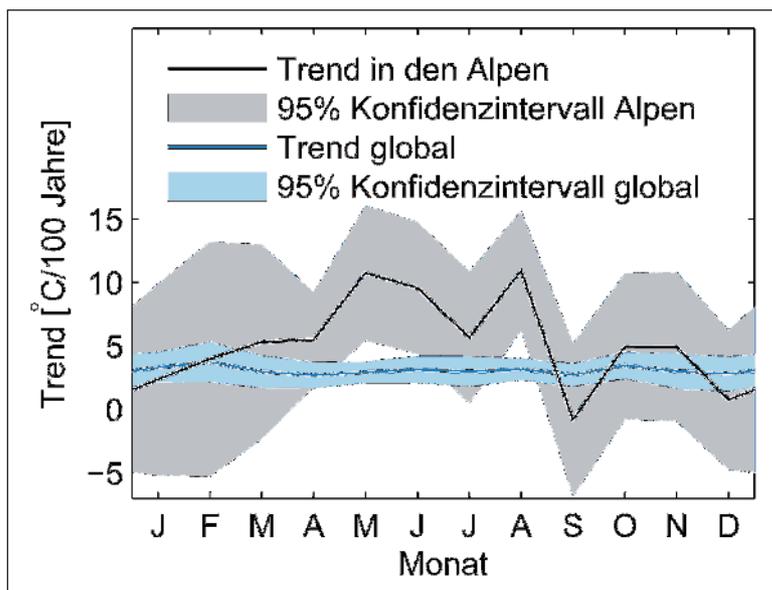


Abb. 3: Linearer, 30-jähriger Trend nach Monaten aufgeschlüsselt, schwarz: Alpenraum, blau: alle Landflächen der Erde. Die Erwärmung der Alpen ist vor allem in den Sommermonaten stärker.

Die starke Erwärmung im Mai und Juni dagegen lässt vermuten, dass die solare Einstrahlung eine Rolle spielt, da sie im Frühsommer ihr Maximum hat. So könnte z. B. eine kürzere Dauer der Schneebedeckung im Gebirge für die Erwärmung mitverantwortlich sein (Punkt 4): durch eine kürzere Schneesaison wird im Frühjahr und Frühsommer weniger Sonnenstrahlung reflektiert und mehr absorbiert, was wiederum zu einer Erwärmung führt. Dieser Mechanismus ist bekannt unter dem Namen Eis-Albedo-Feedback⁷, da er unter anderem eine wesentliche Rolle für die starke Erwärmung in der Arktis spielt, bei der eine Verringerung der Meereisdecke zu verstärkter Erwärmung (und damit wiederum weniger Meereis) führt. Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass durch häufigere Hochdrucklagen

⁷Die Albedo ist ein Maß für Reflektivität der Erdoberfläche.

die Bewölkung in den Alpen abgenommen hat, was zu mehr Sonnenstunden und damit höheren Temperaturen geführt hat (Auer et al. 2007). Es ist dabei fraglich, ob dieser Mechanismus dauerhaft sein kann.

Es wird noch einige Zeit dauern, bis die aufgeworfenen Fragen zufriedenstellend beantwortet werden können. Sollte der Eis-Albedo-Feedback hauptverantwortlich sein, wäre jedenfalls davon auszugehen, dass sich die verstärkte Erwärmung in der Zukunft fortsetzen wird – wahrscheinlich mit einem jahreszeitlich verlagerten Schwerpunkt, der dem Ende der saisonalen Schneedecke folgt.

Das fehlende Verständnis für die Prozesse, die verantwortlich sind für die überraschend starke Erwärmung des Alpenraums bedeutet aber natürlich nicht, dass das Verständnis auf globaler Ebene genauso fehlt. Es ist außerdem weder ein Argument gegen Anstrengungen, den zukünftigen anthropogenen Klimawandel zu begrenzen, noch gegen Bemühungen, auf die bereits geschehene Klimaveränderung zu reagieren.

Literatur

- ARRHENIUS, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine* **41**, 237-76.
- AUER, I., R. BÖHM, A. JURKOVIC, W. LIPA, A. ORLIK, R. POTZMANN, W. SCHÖNER, M. UNGERSBÖCK, C. MATULLA, K. BRIFFA, P. JONES, D. EFTHYMIADIS, M. BRUNETTI, T. NANNI, M. MAUGERI, L. MERCALLI, O. MESTRE, J.-M. MOISSELIN, M. BEGERT, G. MÜLLER-WESTERMEIER, V. KVETON, O. BOCHNICEK, P. STASTNY, M. LAPIN, S. SZALAI, T. SZENTIMREY, T. CEGNAR, M. DOLINAR, M. GAJIC-CAPKA, K. ZANINOVIC, Z. MAJSTOROVIC, E. NIEPLOVAQ (2007): HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* **27**, 17-46, doi:10.1002/joc.1377.
- LEVITUS, S., J. ANTONOV, T. BOYER (2005): Warming of the World Ocean. *Geophysical Research Letters* **32**, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- MITCHELL, T. D., P. D. JONES (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology* **25**, 693–712, doi:10.1002/joc.1181.
- PIELKE, R. A. (2011): *The Honest Broker: Making Sense of Science in Policy and Politics*. Cambridge University Press, 198 Seiten, Cambridge, UK.

Anschrift des Verfassers:

Ass.-Prof. Dr. Ben Marzeion
Institut für Meteorologie und Geophysik
Universität Innsbruck
Innrain 52
A-6020 Innsbruck

Alle Abbildungen vom Verfasser erstellt.