
Auf lange Sicht

Wehe, wenn das Klima sein Feedback gibt

Stossen wir CO₂ aus, setzt dies eine ganze Reihe weiterer Prozesse in Gang. Diese verstärken die Erderwärmung zusätzlich. Wie das funktioniert, erklären wir in fünf Grafiken.

Von [Arian Bastani](#), 02.12.2019

Kohlendioxid ist ein Treibhausgas. Stossen wir grosse Mengen davon aus, müssen wir damit rechnen, dass sich die Erde erwärmt.

Doch wie stark?

Die Frage beschäftigte die Wissenschaft schon vor über 100 Jahren. Svante Arrhenius, ein schwedischer Forscher, stellte dazu die erste Schätzung auf. Eine Verdoppelung des damals als «Kohlensäuregas» bekannten CO₂ würde die Erdtemperatur um 5 Grad erhöhen, mutmasste er 1896, basierend auf Messungen der einfallenden Mondstrahlung während der Nacht.

Inzwischen hat die Forschung grosse Fortschritte gemacht. Berechnungen erfolgen nicht mehr mit Stift und Papier, sondern mit Supercomputern, und basieren auf detaillierten Klimamodellen, die mit Satellitenmessungen gefüttert werden und neben der Atmosphäre auch Ozeane und Gletscher berücksichtigen. Für das Ergebnis dieser Berechnungen hat sich in der Wissenschaft seit 1979 die Bezeichnung «Klimasensitivität» eingebürgert.

Sie gibt an, wie stark die Erdtemperatur steigt, wenn sich der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre gegenüber der vorindustriellen Zeit verdoppelt, also von rund 280 auf 560 Teile pro Million steigt (zur Einordnung: Bis dato hat sich die CO₂-Konzentration knapp verandert halbfacht, auf 410 Teile pro Million.).

Die Klimasensitivität

Welcher Temperaturanstieg ist unter diesen Umständen also zu erwarten?

Lagen die Schätzungen anfänglich noch weit auseinander – der Brite Guy Callendar kam 1938 auf eine weniger als halb so grosse Zunahme von 2 Grad als Arrhenius vor ihm – so näherten sich die Ergebnisse zunehmend an.

Die aktuellste Einschätzung des Weltklimarats stammt aus dem Jahr 2014 und entspricht mit +3 Grad etwa derjenigen des vorherigen Berichts von 2007. Seither hat sich die Datenlage nicht so sehr verändert, dass eine erneute Evaluation nötig wäre, schreibt der Klimarat im letzten Bericht von 2018.

Dass die Modellrechnungen plausibel sind, legt die Erdgeschichte nahe. Aus Eisbohrkernen und anderen Materialproben konnte ermittelt werden, wie die Temperatur in der Vergangenheit jeweils auf CO₂-Zunahmen reagierte.

Doch wie kommt die Reaktion zustande?

Kohlendioxid

Der direkte Einfluss von CO₂ auf die Temperatur ist in der Forschung gut verstanden. Schon im 19. Jahrhundert konnte gezeigt werden, dass das Molekül Wärmestrahlung absorbiert und damit zum Treibhauseffekt beiträgt. Mehr CO₂ in der Atmosphäre bedeutet, dass weniger Wärmestrahlung ins Weltall entweicht und mehr Strahlung zurück zur Erdoberfläche gelangt – der Planet erwärmt sich.

Mit modernen Labormessungen lässt sich ermitteln, wie stark die Erdtemperatur allein aufgrund des Kohlendioxids steigen würde, wenn sich die Konzentration dieses Gases in der Luft verdoppelte: um etwas über +1 Grad Celsius.

Doch dabei bleibt es nicht. Durch die Erwärmung werden weitere Veränderungen in Gang gesetzt, die sich ebenfalls auf die Temperatur auswirken. Sie können die anfängliche Erwärmung massgeblich verstärken.

Feedbacks

Der Fachbegriff für diese Veränderungen heisst «Feedback». Auf Deutsch spricht man üblicherweise von «Rückkopplungseffekten», was allerdings sperriger ist. Darum bleiben wir lieber beim Englischen.

Feedback 1: Wasserdampf

Ein wichtiger Feedback-Prozess ist der Anstieg des Wasserdampfgehalts in der Atmosphäre. Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen. Wir merken dies zum Beispiel im Winter, wenn die Feuchtigkeit, die in unserer warmen Atemluft enthalten ist, in der Kälte zu feinem Nebel kondensiert.

Wasserdampf ist jedoch, ähnlich wie CO₂, ein wirksames Treibhausgas. Enthält die Atmosphäre mehr davon, so verstärkt sich in der Folge auch der Treibhauseffekt – und zwar ungefähr um das Doppelte. Das Feedback durch die feuchtere Luft trägt also ebenfalls gut +1 Grad zur Klimasensitivität bei.

Dass dieser Rückkopplungsprozess keine Erfindung ist, zeigen Daten von Nasa-Satelliten. Sie messen seit Ende der 1980er-Jahre den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Das Ergebnis ist in der folgenden Grafik als Abweichung von der Referenzperiode von 1988 bis 2007 dargestellt.

Zu sehen sind einerseits jährliche Schwankungen. Stark schlägt die Kurve etwa während ausgeprägter El-Niño-Phasen aus, die besonders warme Temperaturen mit sich bringen, wie beispielsweise 1997/98 oder 2015/16.

Andererseits ist ein klarer Anstieg des Wasserdampfgehalts erkennbar. Ausgedrückt wird dieser in Kilogramm pro Quadratmeter, wobei der Quadratmeter die Bodenfläche einer imaginären vertikalen Säule darstellt. Seit Ende der 1980er-Jahre nahm der Wasserdampfgehalt einer solchen Säule im Schnitt um etwa ein Kilogramm zu. Diese Dampfmenge verstärkte den Klimawandel und trug dazu bei, dass die Erdtemperatur schneller anstieg.

Feedback 2: Wolken

Kondensiert der Wasserdampf und bildet er Wolken, wird die Sache allerdings komplizierter. Denn diese haben ambivalente Wirkungen auf die Erwärmung und werden daher als separates Feedback behandelt:

- Einerseits gelangen dünne, hohe Wolken – sogenannte Zirren – unter wärmeren, wasserreicheren Bedingungen weiter in die Atmosphäre hinauf. Dort hindern sie die Wärmeabstrahlung der Erde daran, ins Weltall zu entweichen, und verstärken so die Erwärmung. Der Effekt überwiegt an jenen Orten, wo die Erde viel Wärme abstrahlt und wo die Luft bis weit oben in der Atmosphäre vergleichsweise feucht ist: in den Tropen.
- Andererseits werden Wolken durch die zunehmende Wassermenge «optisch dichter». Dadurch reflektiert ihre helle Oberfläche – besonders bei dicken, tief liegenden Wolken – mehr einfallende Sonnenstrahlung, was der Erderwärmung entgegenwirkt. Dieser Effekt fällt vor allem dort ins Gewicht, wo es viele solche tiefe Wolken gibt und wo wenig Wärme vorhanden ist: über dem Südpolarmeer.

Das Ergebnis dieser gegenläufigen Effekte ist auf der folgenden Karte zu sehen. In den Tropen, insbesondere über dem Äquatorial-Pazifik, wo Wolken die Erderwärmung eher verstärken, ist sie rot eingefärbt. In den höheren Breitengraden, vor allem über dem Südpolarmeer, signalisiert Blau, dass Wolken die Erderwärmung an diesen Orten eher abschwächen.

Von den beiden gegenläufigen Wolken-Feedbackprozessen überwiegt, gemäss aktuellem Stand der Wissenschaft, der verstärkende Effekt. So erhöht sich die Klimasensitivität unter dem Strich um etwa 0,5 Grad Celsius. Doch die diesbezügliche Unsicherheit ist grösser als bei allen anderen Feedbacks. Verschiedene Modelle beziffern den Effekt von Wolken sehr unterschiedlich.

Feedback 3: Albedo

Eindeutiger ist der Effekt eines anderen Feedbacks. Wie die tief liegenden Wolken reflektieren auch Schnee- und Eisflächen fast die gesamte Strahlung, die von der Sonne auf sie eintrifft, zurück ins Weltall. Mit zunehmender Temperatur schmelzen Schnee und Eis im Sommer jedoch immer stärker ab. Dadurch sinkt die Reflektivität der Erdoberfläche, die sogenannte Albedo.

Besonders stark ist dieser Feedback-Effekt im arktischen Polarmeer (also der Ozeanfläche nördlich von 60 Grad Nord). Wie die folgende Grafik zeigt, hat die Reflektivität dieser Region bereits signifikant abgenommen. Abgebildet sind Nasa-Satellitenmessungen über das Sommerhalbjahr. Im Vergleich zu 1980 reflektiert sie heute etwa 6 Prozent weniger Sonneneinstrahlung.

Dieser markante Trend überrascht nicht, denn das arktische Meereis hat über die letzten Jahrzehnte einiges an Fläche eingebüsst. In wenigen Jahrzehnten könnte das Meereis zum Sommerende ganz verschwinden.

Die Temperaturwirkung des Eises ist allerdings vergleichsweise gering. Die Oberflächen-Albedo erhöht die Klimasensitivität nur um gut 0,1 Grad Celsius.

Schluss

Viele Leute fragen sich, wie ein kleines Molekül – Kohlendioxid – eine so starke Wirkung aufs Klima ausüben kann. Ein Teil der Antwort ist nun klar. Das CO₂ wirkt nicht allein, es löst eine Kettenreaktion aus: Mehr Wasser in der Atmosphäre verstärkt den Treibhauseffekt; höher gelegene Wolken halten mehr Wärme zurück; weniger Eis reflektiert weniger Sonnenlicht.

Diese Feedbacks sind keine Statisten auf der Klimabühne – sie machen, zählt man alles zusammen, den Grossteil der Klimasensitivität aus. Sie sind über einen Zeitraum von Monaten bis Jahren massgebend dafür, wie die Erdtemperatur auf unsere CO₂-Emissionen reagiert.

Dies nicht zuletzt, weil sich die Feedbacks gegenseitig verstärken. Isoliert betrachtet summieren sich die einzelnen Rückkopplungsprozesse auf deutlich weniger als +3 Grad Celsius. Doch in der Wirklichkeit existieren zusätzliche Wechselwirkungen zwischen den Feedbacks. Diese gegenseitigen Verstärkungen fügen nochmals rund 0,4 Grad zur Klimasensitivität hinzu.

Die Klimasensitivität exakt zu beziffern, ist wichtig. Von ihr hängt ab, wie viel CO₂ wir noch emittieren dürfen, ohne dass die Erwärmung ausser Kontrolle gerät. Je höher die Sensitivität, desto kleiner das verbleibende CO₂-Budget.

Zwei Punkte haben wir dabei allerdings noch nicht berücksichtigt:

- Der Einfluss der einzelnen Feedbacks ist über die Zeit hinweg nicht konstant. Je weniger Polareis etwa existiert, desto geringer wird der Temperatureffekt über die Oberflächen-Albedo. Käme die Erde einmal an den Punkt, wo alles Eis abgeschmolzen ist, so würde die Temperatur weniger empfindlich auf weitere Kohlendioxid-Emissionen reagieren.
- Auf die lange Sicht kommen – zusätzlich zu den hier genannten – weitere Feedbacks hinzu: zum Beispiel die schwächere Ozeanzirkulation und die Permafrostschmelze. In den gezeigten Berechnungen sind sie noch nicht inbegriffen. Doch es gibt bereits Anzeichen dafür, dass sie in Gang geraten.

Was dies für die Klimasensitivität bedeutet – und damit auch für die Menge an CO₂, die die Welt noch ausstossen darf, um die Erwärmung auf 1,5 Grad

zu limitieren –, damit beschäftigen wir uns an dieser Stelle in einigen Wochen.