

Das also war das Ergebnis der Messungen einer Heerschar von Freiwilligen, die auf der ganzen Welt mehrmals am Tag hinausgehen, um zu festen Uhrzeiten die Temperaturen zu messen. Und das geht nicht ohne aufwendige Organisation: Diese Freiwilligen müssen ausgebildet werden, die gemessenen Daten von den Wetterdiensten gesammelt und aufgehoben werden, sie müssen auf Fehler geprüft und untereinander ausgetauscht werden. Natürlich hat man diese unzähligen Messungen nicht gemacht, um zu sehen, ob sich das Klima ändert – diese Daten wurden zu einem ganz anderen Zweck gesammelt, nämlich zur Wettervorhersage.

Das Problem mit den städtischen Wärmeinseln hat man übrigens lösen können, indem man Wetterstationen in Städten mit benachbarten Stationen auf dem Land verglichen hat. Verdächtige Stationen werden einfach ausgeschlossen. Seit 1979 gibt es überdies Satellitenmessungen, und sie bestätigen den Erwärmungstrend.

Inzwischen ist die Erwärmung zudem derart deutlich spür- und sichtbar, dass wir selbst ohne die Messungen der Wetterstationen keinen Zweifel daran hätten. So schrumpfen fast überall auf der Welt die Gletscher in den Gebirgen dramatisch. Das hat ja auch den »Ötzi« ans Tageslicht befördert, der über 5000 Jahre im Eis eingeschlossen war. In den Alpen ist im Lauf der letzten hundert Jahre schon die Hälfte der Gletschermasse verschwunden! Auch treiben die Pflanzen im Frühjahr heute ein bis zwei Wochen früher aus als noch vor dreißig Jahren, und die Zugvögel treffen eher ein.

Messbar ist die Erwärmung überdies in den Weltmeeren. Und wenn Außerirdische die Erde aus den Tiefen des Weltalls beobachten sollten, wüssten sie ebenfalls Bescheid. Sie könnten durch ihre Teleskope beobachten, wie die Eisdecke auf unserem Nordpolarmeer kleiner und kleiner wird.

Schwindendes Eis

Die sommerliche Eisdecke auf dem Nordpolarmeer hat sich in den letzten dreißig Jahren fast halbiert. Zugleich wird das verbleibende Eis dünner. All das geschieht schneller als in den Modellrechnungen vorhergesagt. Manche Forscher befürchten, dass schon in weniger als zwanzig Jahren das Polarmeer im Sommer weitgehend eisfrei sein könnte. In der Antarktis sieht man dagegen bislang keine auffällige Veränderung der Meereisdecke; die physikalischen Verhältnisse sind dort anders.

Ist der Mensch wirklich schuld?

Es wird wärmer, das ist klar. Aber ist wirklich der Mensch schuld, oder könnte es nicht doch einen anderen Grund geben? Manchmal liest man in der Zeitung doch etwas von »natürlichen Zyklen« oder vom Einfluss der Sonne?

Sehr viele Gründe kommen für eine Erwärmung gar nicht infrage, denn die Energiebilanz unseres Planeten ist ja recht einfach: Sonnenwärme trifft auf die Erde, ein Teil der Sonnenwärme wird zurückgespiegelt, und außerdem strahlt die Erde selbst Wärme ab. Einer dieser drei Faktoren muss sich geändert haben – eine andere Erklärung für die Erwärmung kann es nicht geben.

Moment, gibt es nicht eine Möglichkeit Nummer vier: dass im Ozean gespeicherte Wärme an die Luft abgegeben wurde? Nein, die scheidet aus, und zwar weil die Wärmemenge im Ozean zugenommen, nicht abgenommen hat – das zeigen die Temperaturmessungen aus den Weltmeeren. Nicht nur an der Oberfläche, sondern bis in große Tiefen hinein hat das Meerwasser sich erwärmt. Und einen anderen großen Wärmespeicher außer dem Ozean gibt es nicht.

Also zurück zu den drei Möglichkeiten, die Strahlungsbilanz zu verändern. Kommt heute vielleicht mehr Sonnenstrahlung bei uns an als früher? Schwankungen der Sonnenaktivität haben in der Erdgeschichte immer wieder das Klima verändert, das stimmt. Zum Beispiel in der Periode des Maunder-Minimums in den Jahren 1650 bis 1700. Damals strahlte die Sonne wahrscheinlich besonders schwach. Zumindest schließt man das aus Aufzeichnungen über die Sonnenflecken, die kurz nach der Erfindung des Fernrohrs im Jahr 1609 entdeckt worden waren.

Zur Zeit des Maunder-Minimums gab es auf einmal keine Flecken auf der Sonne mehr – und aus Mes-



sungen in den letzten Jahrzehnten wissen wir, dass die Sonne umso heller strahlt, je mehr Flecken sie hat, weil es dann zugleich mehr sogenannte Fackeln, ganz besonders helle und heiße Bereiche in der Sonne, gibt. Zur Zeit des Maunder-Minimums war das Klima der Erde daher kälter als sonst. Allerdings betrug die Abkühlung nur einige Zehntel Grad, und die Sonne strahlte auch nur den Bruchteil eines Prozents schwächer.

Doch egal wie stark die Schwankungen in der Vergangenheit gewesen sein mögen, eines wissen wir sicher, weil es ständig gemessen wird: Die Sonnenstrahlung hat in den letzten fünfzig Jahren nicht zugenommen. Davor, bis etwa 1950, wurde die Sonne allerdings etwas heller, und das kann einen Teil der Erwärmung in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts erklären. In den letzten zwanzig Jahren wurde die Sonne aber sogar wieder schwächer, wie unter anderem Satellitenmessungen zeigen. Derzeit ist sie so schwach wie nie zuvor, seit man in den 1970er Jahren mit Satellitenmessungen begonnen hat. Wenn die Sonne überhaupt eine Klimaänderung während der letzten Jahrzehnte bewirkt hat, dann eine leichte Abkühlung. Die ist aber zu schwach, um die globale Erwärmung spürbar gebremst zu haben.

Wie steht es mit der zweiten Möglichkeit: Ist die Erdoberfläche vielleicht dunkler geworden, oder hat die Wolkenbedeckung abgenommen, sodass wir einfach weniger Sonnenwärme zurckspiegeln? Eine Idee ist, dass vielleicht Strahlung aus dem Weltall die Bewölkung verändert haben könnte. Ob solche kosmischen Strahlen überhaupt einen Einfluss auf Wolken haben, ist allerdings umstritten. Wichtiger ist, dass schon seit 1953 die Menge an kosmischen Strahlen, die auf der Erde ankommt, dauernd gemessen wird. Sie hat sich wenig verändert, kann also auch keine Veränderung der Wolkendecke verursacht haben. Tatsächlich schwankt die

Flecken auf der Sonne

Sonnenflecken sind kühle, dunkle Flecken auf der Sonne – in der Mitte eines Flecks ist die Sonnenoberfläche nur 4000 Grad Celsius heiß statt knapp 6000 Grad Celsius wie sonst. Die Zahl der Sonnenflecken schwankt in einem Rhythmus von ungefähr elf Jahren, dem Schwabe-Zyklus.



Menge an kosmischer Strahlung vor allem im Einklang mit dem elfjährigen Sonnenzyklus auf und ab, aber das macht sich kaum im Klima bemerkbar – es ist nicht alle elf Jahre besonders warm.

Der Mensch nimmt dagegen selbst Einfluss darauf, wie viele der Sonnenstrahlen zurückgespiegelt werden, und zwar durch Schmutz in der Luft: die braune Dunstglocke, die man manchmal über Städten mit vielen Abgasen aus Autos und Schornsteinen sieht. Dieser sogenannte Smog kühlt jedoch das Klima, weil weniger Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Smog ist daher auch die Erklärung dafür, wieso es von 1940 bis 1975 zeitweilig nicht wärmer, sondern sogar leicht khler wurde, besonders auf der Nordhalbkugel. Denn in dieser

Zeit nahm der Smog stark zu, besonders auf der Nordhalbkugel – wo es viel mehr menschliche Ansiedlungen gibt –, und wirkte der Erwärmung durch die Treibhausgase entgegen. Später hat man den Smog durch Filter auf den Schornsteinen bekämpft, weil er der Gesundheit schadet.

Die Helligkeit der Erdoberfläche verändert sich auch: Eisflächen, die Sonnenstrahlen reflektieren, schrumpfen, vor allem in der Arktis, und dadurch wird mehr Sonnenwärme aufgenommen. Das kann allerdings nicht die Ursache der globalen Erwärmung sein, weil das Schmelzen des Eises ja bereits eine Folge der Erwärmung ist. Eine folgenreiche Folge dazu: Denn je mehr Eis schmilzt, desto mehr Sonnenwärme wird aufgenommen, und die wiederum lässt das verbliebene Eis noch schneller schmelzen. Das Schrumpfen des Eises wirkt also wie ein Verstärker und Beschleuniger der Erwärmung.

Bleibt also nur Erklärung Nummer drei übrig: Die Abstrahlung von Wärme von der Erde ins All muss sich verändert haben. Und wir wissen ja seit Jahrzehnten, dass sie das tatsächlich tut. Wir wissen aus den Messungen des hartnäckigen Keeling und anderer Forscher, in welcher Weise sich die Menge an Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen verändert. Wir wissen, dass wir es sind, die diese Gase in die Luft blasen. Wir verstehen, wie sich das auf den Strahlungshaushalt unserer Erde auswirkt. Diese Strahlung wird sowohl am Boden von zahlreichen Strahlungsmessstationen als auch im All von Satelliten gemessen.

Wir können uns die Situation in etwa so vorstellen, als würde man den Herd unter einem Topf Wasser anstellen, woraufhin das Wasser immer wärmer wird. Wir verstehen, wo die Wärme herkommt und wie das funktioniert. Die Herdwärme reicht genau aus, um die beobachtete Erwärmung des Wassers zu erklären. Irgendei-

nen anderen Grund, wieso das Wasser wärmer werden sollte, gibt es nicht. Wer würde da zweifeln, dass es am Herd liegt, dass das Wasser sich aufheizt?

Deswegen sind die Klimaforscher sich längst sicher und einig, dass wir Menschen die globale Erwärmung verursachen. Und dass nur wir Menschen sie stoppen können, wenn wir das wollen. Vielen scheint es aber sehr schwerzufallen, das zu glauben – viel schwerer als die Sache mit dem Herd. Vielleicht weil es gefühlsmäßig nicht einfach zu begreifen ist, dass wir Winzlinge etwas so Riesiges wie das Klimasystem der Erde verändern können. Die Physiker sind da etwas anders: Wir sind es gewohnt, uns lieber auf Energiebilanzen zu verlassen als auf unser Gefühl.

Vielleicht verschließen auch viele Menschen die Augen vor dieser Erkenntnis, weil sie ihnen Angst oder ein schlechtes Gewissen macht. Weil sie ja selbst zu dem Problem mit beitragen. Aber es hilft nicht, den Kopf in den Sand zu stecken. Das Einzige, was hilft, ist, dem Problem nüchtern in die Augen zu blicken und eine Lösung zu suchen.

Dabei ist es eigentlich ein Glück, dass wir es sind, die das Klima aufheizen. Denn es bedeutet ja, dass wir die Erwärmung auch aufhalten können. Läge die Erwärmung stattdessen an der Sonne, könnten wir gar nichts dagegen tun und wären ihr hilflos ausgeliefert. *Das wäre wirklich eine schlechte Nachricht!*

Der Eingriff des Menschen in das Erdsystem ist inzwischen so tief und umfassend, dass immer mehr Forscher davon ausgehen, dass ein neues geologisches Zeitalter begonnen hat. Das Holozän, wie die nach dem Ende der letzten Eiszeit einsetzende wärmere Zeit genannt wird, ist demnach vorbei, und wir leben seither im Anthropozän, das heißt in der »Menschzeit«.

Der Erdsimulator

In Japan steht ein riesiger Supercomputer, der speziell für Klimasimulationen gebaut wurde. Pro Sekunde schafft er unvorstellbare 35 Billionen (35×10^{12}) Rechenoperationen. Damit kann man das Klima für die ganze Erde mit einer Maschenweite von 10×10 Kilometern berechnen. Das teure Stück ist mit einem aufwendigen Gitternetz vor Blitzschlag geschützt. Das Gebäude ist außerdem durch Gummifüße gegen Erdbeben gesichert.

