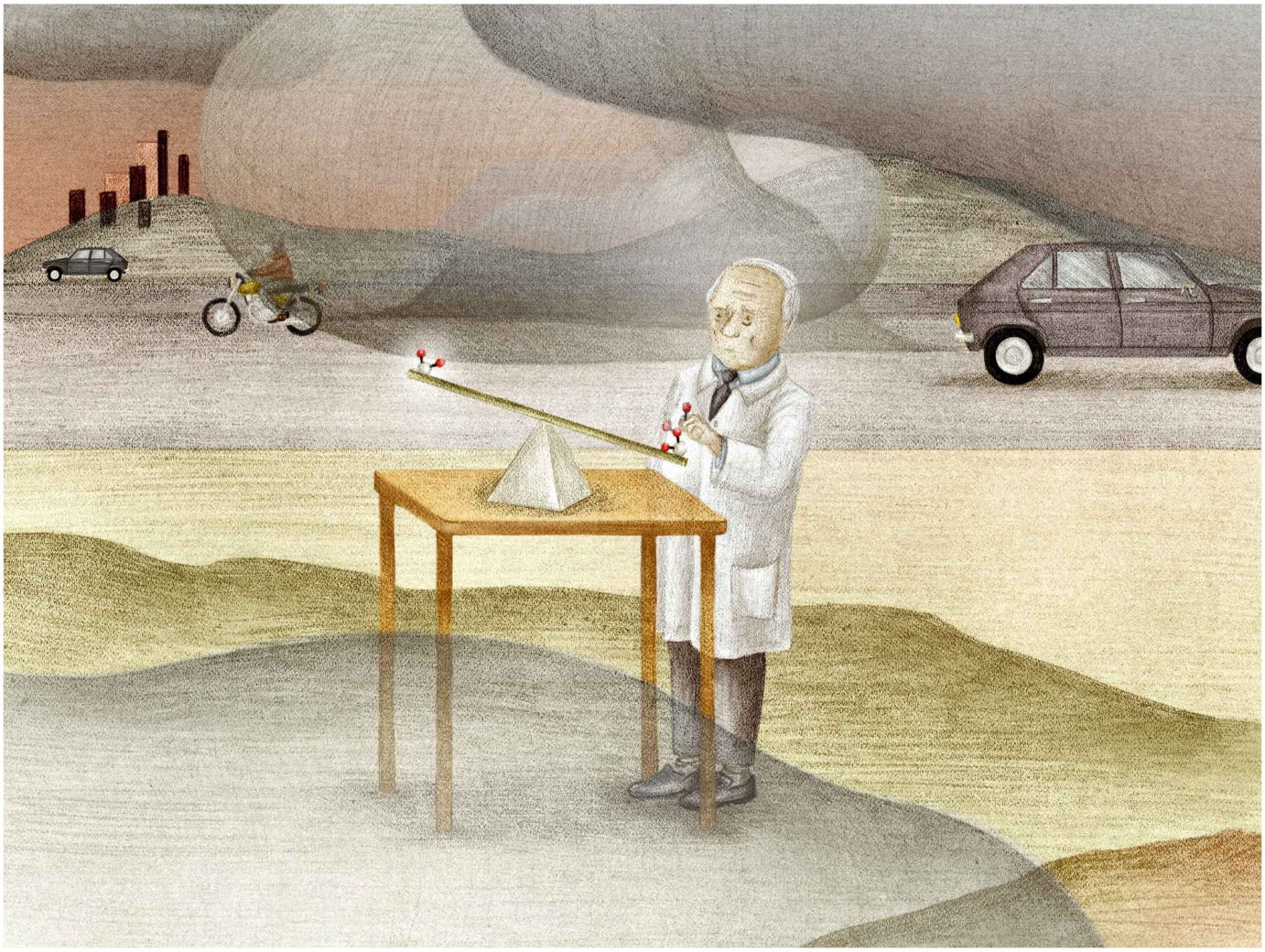


Tödliches Tauwetter

Wie herauskam, dass das Klima bereits auf kleine Mengen Treibhausgas sehr empfindlich reagiert: Teil 3 unserer Serie über die Wissenschaftsgeschichte des Klimawandels.

Von Arian Bastani (Text) und Kwennie Cheng (Illustration), 17.12.2018

Edward Lorenz staunt nicht schlecht, als er aus der Kaffeepause zurück ins Büro kommt. Sein Computer, auf dem gerade eine Wettersimulation läuft, spuckt völlig verkehrte Zahlen aus.

Der Rechner wird eine Schraube locker haben, vermutet Lorenz – Abstürze sind keine Seltenheit im Jahr 1961, als Computer noch grosse Maschinen sind, die mit Lochkarten gefüttert werden und ganze Büroräume füllen.

Doch der 44-jährige Amerikaner urteilt vorschnell. Und wie.

Der Flügelschlag der Seemöwe

Lorenz ist Mathematiker. So, wie man sich einen solchen vorstellt: ruhig und schüchtern. Sein ganzes Leben verbringt er in Neuengland. Schon als Kind ist er fasziniert vom Wetter. Nach dem Mathematikstudium dient er im Zweiten Weltkrieg dem US Army Air Corps als Meteorologe, später erhält er eine Professorenstelle am Massachusetts Institute of Technology, der renommiertesten technischen Hochschule in den Vereinigten Staaten.

Die Entdeckung, mit der Lorenz berühmt werden sollte, macht er per Zufall.

An einem kalten Wintertag will er in seinem Büro eine Wettervorhersage wiederholen, die sein Computer zuvor berechnet hat. Dies, um ein paar Details genauer zu untersuchen. Die Prozedur ist langwierig: Der Forscher muss Temperatur, Feuchtigkeit und dergleichen im Lauf der Berechnung ausdrucken und sie für einen neuen Durchlauf von Hand erneut eingeben.

Die Zahlen haben viele Nachkommastellen. An einem Punkt nimmt Lorenz eine Abkürzung: Er rundet und tippt für die Windgeschwindigkeit statt 10,506127 nur noch 10,506 Meter pro Sekunde ein. Doch das verändert alles. Das Wetter beginnt sich vollkommen anders zu entwickeln als beim ersten Mal: Stürme aus der ursprünglichen Prognose verschwinden, andere tauchen in der Wiederholung wie aus dem Nichts auf.

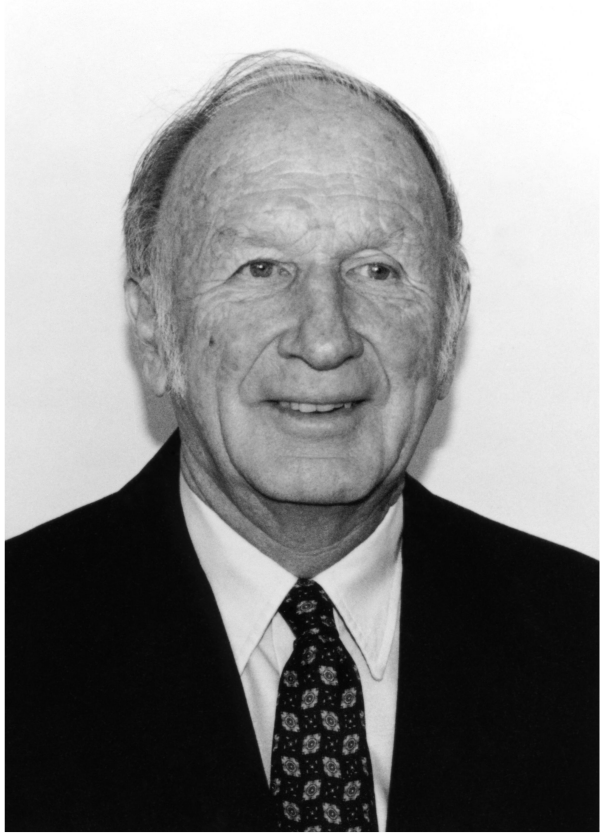
Der Wissenschaftler aus Boston stutzt. Erst vermutet er einen Programmierfehler. Doch auch nach gründlicher Suche findet er zu seinem Erstaunen kein Anzeichen dafür: Die Berechnungen sind korrekt.

Damit ist klar: Die Unterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Durchlauf hat Lorenz mit seinen Rundungen selbst verursacht. Anfangs führen sie nur zu minimalen Abweichungen. Etwa an jedem vierten Tag verdoppelt sich aber der Unterschied – bis die Ähnlichkeit zwischen den Simulationen völlig verschwindet und die Rundungsfehler die Wetterprognose dominieren.

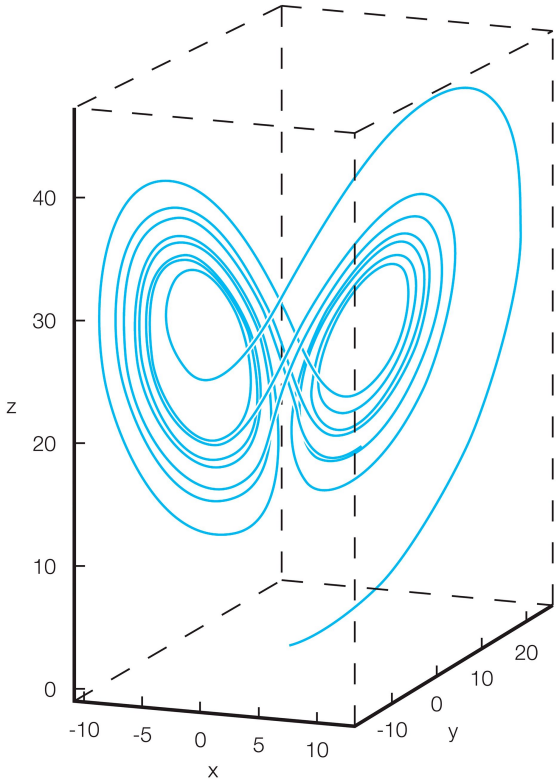
Seiner mathematischen Intuition folgend, geht Lorenz der Sache nach. Er will überprüfen, ob die Resultate seiner Prognosenwiederholung allgemeingültig sind. Dazu erstellt er ein Atmosphärenmodell, das nur aus drei Gleichungen besteht, und zeichnet darauf basierend eine Grafik: Sie zeigt mehrere Linien, die praktisch am selben Punkt beginnen – und davon ausgehend in komplett unterschiedliche Bahnen gelenkt werden. Das Bild erinnert an einen Schmetterling. Es repräsentiert zugleich die Ordnung und das Chaos:

- Die Ordnung, da es keine groben Ausreisser aus dem Muster gibt. Das ist bei Wetterprognosen sinnvoll: Die Atmosphäre lässt nicht zu, dass ein Sturm unkontrolliert ausarten kann – irgendwann legt sich der Wind immer.
- Das Chaos, da sich die Linien scheinbar zufällig mal um den einen, dann um den anderen Flügel winden: Eine Strömung wird zum Sturm, während die andere kaum einen Laubhaufen zu verwehen vermag – auch wenn sie anfangs praktisch identisch waren.

Lorenz, ein begnadeter Dozent, baut eine Theorie daraus: Ungenauigkeiten in den meteorologischen Ausgangsdaten – zur Temperatur, der Windgeschwindigkeit und dergleichen – können über die Zeit zu gewaltigen Fehlern führen. Der MIT-Professor sagt: Eine Seemöwe kann unter gewissen Umständen mit einem Flügelschlag einen Sturm auslösen.



Anfänglich sprach er von einem Seemöwen-Flügelschlag, später von einem Schmetterlingseffekt: Edward Lorenz. AIP Emilio Segrè Visual Archives/Keystone



Von kleinen Rundungsunterschieden hängt ab, in welches Extrem das Wetter tendiert: Visualisierung von Lorenz' Modellgleichungen. Encyclopaedia Britannica/UIG/Getty Images

Die Theorie bricht mit dem deterministischen Weltbild der Wissenschaft, wie es bis dahin vorherrscht. Ein Paukenschlag, eigentlich. Doch Lorenz ist öffentlichkeitsscheu. Ein Jahrzehnt vergeht, ehe er seine Ideen mit einem Vortrag einem breiteren Publikum präsentiert. Den Titel erfindet ein Fachkollege: «Vorhersehbarkeit: Kann der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien einen Tornado in Texas auslösen?»

Der Vortrag über den Schmetterlingseffekt weckt die Forschergemeinde auf. Lorenz' Erkenntnisse bedeuten, dass Wettervorhersagen ab einer Dauer von fünf bis zehn Tagen aus Prinzip extrem schwierig sind – die Zukunft lässt Entwicklungen zu, die in der Gegenwart noch niemand erahnen kann.

Doch Lorenz bringt nicht nur Wetterfrösche ins Grübeln. Sondern Denker verschiedenster Disziplinen. Seine Theorie drückt mathematisch aus, was der Mensch täglich erlebt: Details können das Leben auf den Kopf stellen.

Eine Begegnung hier, ein Geschehnis da – und plötzlich wird alles anders.

Russiger Schnee

An diesen Gedanken würden sich bald auch die Klimaforscher gewöhnen.

Jenseits des Eisernen Vorhangs wird in den 1950er-Jahren an konkreten «Klima-Anwendungen» gearbeitet. Eine Idee ist: Russ auf Schnee- und Eisflächen im Norden zu verteilen, damit das dortige Eis schneller schmilzt.

Der damaligen Wissenschaft ist bereits bekannt, dass dunkle Oberflächen weniger Sonnenstrahlen reflektieren – und mehr davon als Hitze absorbieren. Die sowjetischen Planer wollen diesen Effekt nutzen, um die weiten Steppen des Landes zu bewirtschaften: Die kargen Gebiete sollen mit

Schmelzwasser bewässert werden, das die grossen Flüsse aus Sibirien nach Süden führen.

Einer, der mit dem Projekt betraut wird, ist Michail Budyko: ein Forscher aus Leningrad, der, wäre er nicht Wissenschaftler geworden, mit seinen harten Gesichtszügen durchaus auch das Zeug zum James-Bond-Schurken gehabt hätte.

Budyko ist ein Naturtalent. Nach dem Krieg macht er sein Studium der Geologie und der Physik am Polytechnikum. Im Anschluss wird er eingeladen, am Geophysikalischen Observatorium in Leningrad zu forschen. Zehn Jahre später, 1954, ist er Direktor des Instituts – und im Alter von 34 Jahren damit verantwortlich für die gesamte klimatologische Forschung der Sowjetunion.

Budyko ist ein selbstbewusster, eigensinniger Typ, der die Provokation nicht scheut. So begnügt er sich auch nicht mit sibirischen Flüssen. Den jungen Direktor interessieren vielmehr globale Zusammenhänge. Diese untersucht er zielstrebig, von einem Schritt zum nächsten, ohne sich beirren zu lassen.

Und so befasst sich Budyko nicht bloss mit sibirischen Steppen, sondern entwirft gleich ein «Energiebudget» für den ganzen Planeten. Es beschreibt, welchen Einfluss die Sonneneinstrahlung auf die Temperatur der Erde hat.

Seine Resultate sind erstaunlich:

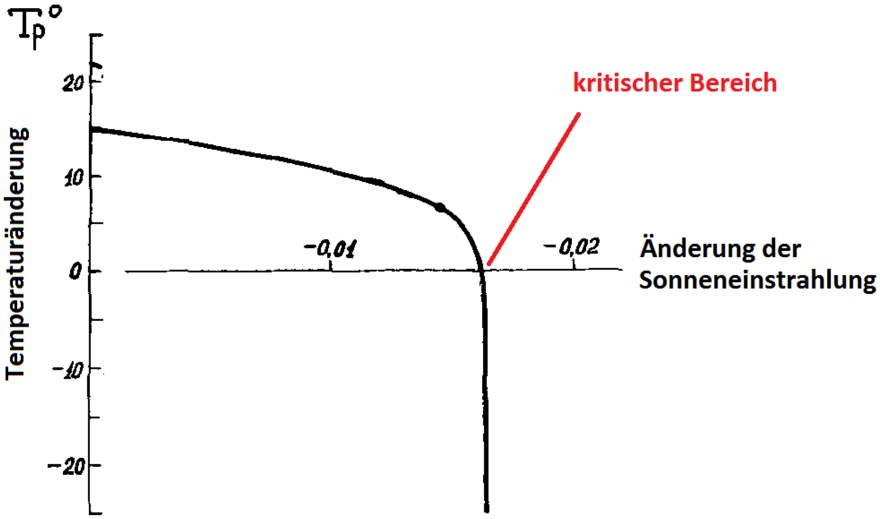
Oberhalb eines gewissen Bereichs ist die Beziehung in etwa linear, also gleichmässig: Je mehr Sonnenstrahlen auf die Erde kommen, desto wärmer wird es. Je weniger Strahlen, desto kälter.

Je näher man aber dem kritischen Bereich kommt, desto stärker reagiert die Temperatur – bis sie an einem bestimmten Punkt fast ins Bodenlose fällt.

Es ist eine sonderbare Dynamik. Budyko realisiert, dass dafür die Albedo verantwortlich ist. Also die unterschiedliche Reflexion von Strahlen je nach Farbe: jene Eigenschaft, die dunkle von hellen Materialien unterscheidet und die dem Plan zugrunde lag, Gletscher mit Russ zum Schmelzen zu bringen.

Die Albedo steht also im Zentrum eines sich selbst verstärkenden Effekts bei der Erdtemperatur. Je niedriger diese fällt, desto mehr Schnee und Eis bildet sich: Die Albedo nimmt zu, mehr Sonnenstrahlen werden reflektiert. In der Folge bleibt allerdings noch weniger Wärme an der Oberfläche zurück. Was wiederum zu weiterer Abkühlung führt, zu noch mehr Schnee und Eis und zu noch mehr Reflexion – bis die Erde irgendwann zum Gefrierschrank wird.

Michail Budyko erkannte, dass sich die Erdtemperatur sprunghaft verändern kann ... AIP Emilio Segrè Visual Archives



... wenn die Sonneneinstrahlung sich rund um einen kritischen Bereich bewegt. aus: Budyko, 1969

Nach Ansicht des sowjetischen Forschers ist die Erde in unmittelbarer Nähe des kritischen Bereichs. Schon eine kleine Abnahme der Sonneneinstrahlung genügt, um die verfügbare Wärmemenge so weit zu senken, dass sich das Polareis stark ausbreiten könnte – ein starker Rückkopplungseffekt setzt ein.

Umgekehrt würde bereits eine leichte Strahlungs- und Temperaturzunahme die Polkappen grossflächig abschmelzen, und ein viel wärmeres Klima stellte sich ein – es käme zum Rückkopplungseffekt in der anderen Richtung.

Die Situation lässt sich mit einer Schaukel vergleichen. Auf beiden Seiten sitzt ein gleich schweres Kind, beide Kinder sind in der Luft. Gibt man dem einen Kind einen kleinen Stein in die Hand, kippt die Schaukel auf die Seite dieses Kindes. Entsprechend würde ein kleines bisschen mehr oder we-

niger Wärme genügen, damit das Klima in den entsprechenden Zustand kippte.

Der momentane Zustand der Erde ist somit höchst instabil. Konsequent macht Budyko den nächsten Gedankenschritt: Steigt der Energieverbrauch des Menschen und nimmt damit auch der Treibhauseffekt zu, so verändert sich das Energiebudget des Planeten radikal. Das Klima kippt.

Anders als auf dem Spielplatz hätte dies aber tief greifende Folgen. Würden die Kohle-, Öl- und Gasvorkommen der Erde in unvermindertem Tempo weiter verfeuert, so könnte laut Budyko bereits Mitte des 21. Jahrhunderts alles Polareis abschmelzen. Er beschreibt dies als «klimatische Katastrophe», die dazu führen würde, dass «höhere Formen des Lebens» ausstürben.

Es ist ein Horrorszenario, das der Sowjetforscher umreisst – ein Szenario, das in offensichtlichem Widerspruch zur traditionellen Anschauung steht, wonach das Klima beständig ist. Was ist an ihm dran? Klar ist: Um das zu beurteilen, genügen theoretische Indizien und rechnerische Modelle allein nicht.

Kerosin gefriert nicht

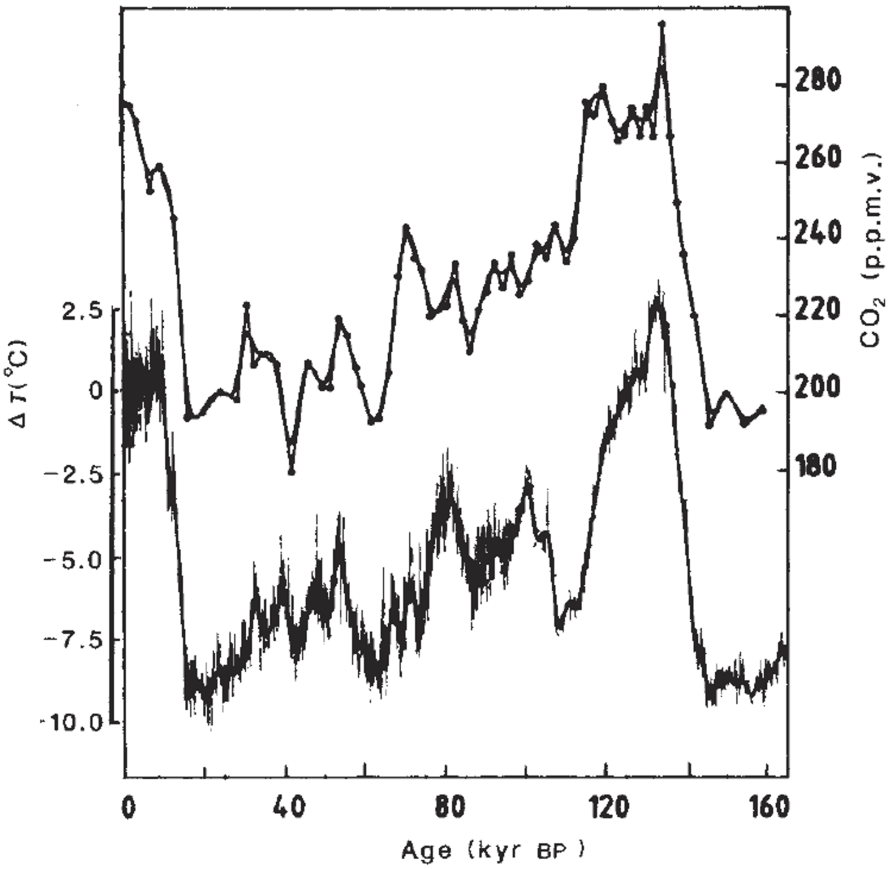
Es braucht empirische Forschung – beispielsweise um herauszufinden, ob die Klimaschaukel in der fernen Vergangenheit schon einmal gekippt ist.

Dazu macht sich Anfang der 1980er-Jahre eine Forschungsexpedition auf. Geleitet wird sie von Claude Lorius, einem französischen Pionier der Polarforschung und leidenschaftlichen Abenteurer. Er soll eine Gruppe von Wissenschaftlern an den kältesten Ort des Planeten führen: die Antarktis.

Grobe Hinweise auf vergangene Klimaschwankungen gibt es an und für sich genug. Rund 10’000 Jahre liegt etwa die letzte Eiszeit zurück. Sie hinterliess auch in der Schweiz ihre Spuren: in Form von Findlingen, also riesigen Felsbrocken mitten in der Landschaft, oder von Schuttablagerungen wie dem Uetliberg in Zürich, die durch Gletscher verursacht wurden.

Doch darüber, wie die Klimaschaukel auf der kalten Seite landete und wie sie danach wieder ins Gleichgewicht kam, gibt der Uetliberg nicht viel Aufschluss. Eine reichhaltigere Informationsquelle ist Eis. Altes Eis, das Schwankungen dieser Art miterlebt hat. Also idealerweise Antarktiseis.

Um dieses Eis zu finden, bricht Lorius also auf in Richtung Süden. Mitten im Kalten Krieg werden er und seine französischen Kollegen von der US Navy zur sowjetischen Forschungsstation Vostok transportiert – die wissenschaftliche Zusammenarbeit funktioniert trotz politischem Konflikt.



Die CO2-Konzentration (obere Kurve) und die Erdtemperatur (untere Kurve) laufen parallel. aus: Barnola et al., 1987

Grenzenloses Teamwork: Amerikanische, sowjetrussische und französische Forscher 1984 mit eisigem Bohrkern in der Antarktisstation Vostok. In der Mitte Claude Lorius (ganz in Blau). Claude Lorius Archive

Die Station liegt im Zentrum des antarktischen Kontinents, nahe dem südlichen geomagnetischen Pol, auf knapp 3500 Metern über Meer. Minus 89 Grad Celsius werden dort im Jahr 1983 gemessen. Es ist so kalt, dass Treibstofffässer erst in Brand gesteckt werden müssen, bevor damit Fahrzeuge betankt werden können. Für viele Menschen wäre es die Hölle auf Erden. Für Lorius, den Glaziologen aus Besançon, ist es ideales Terrain.

Mit seinen 51 Jahren ist er bereits ein Routinier der Polarforschung. Seine erste Expedition liegt dreissig Jahre zurück: Als junger Forscher verbringt er ein ganzes Jahr in der Antarktis. Die meteorologischen Messungen finden unter härtesten Bedingungen statt: Lorius leidet unter Vitaminmangel und Schneeblindheit. Trotzdem ist die Leidenschaft entfacht: Immer wieder sucht der charismatische Franzose die Nähe zur endlosen weissen Wüste.

Jahrzehntelang träumt Lorius davon, besonders tief ins antarktische Eis zu bohren. Nun ist es so weit. Im antarktischen Sommer 1982 beginnen die Bohrarbeiten. Doch es geht langsam voran, die Kälte droht den Fortschritt zunichtezumachen. Immer wieder wird Kerosin in das Bohrloch geschüttet, damit dieses nicht zufriert. Der beissende Geruch ist allgegenwärtig.

Nicht nur die Kälte, auch die Höhe macht den Forschern zu schaffen. Das beste Mittel der Sowjets dagegen: Wodka. 1983 erreicht die Bohrung schliesslich die angestrebten 2 Kilometer Tiefe. 150'000 Eisschichten werden zutage gefördert – und 150'000 Jahre an Erdgeschichte zugänglich.

Aus jeder Schicht lässt sich die ungefähre Temperatur rekonstruieren, die bei ihrer Entstehung herrschte. Ausserdem enthält das Gletschereis konservierte Momentaufnahmen der damaligen Atmosphäre. Dies, weil darin winzige Luftblasen über die Jahrtausende eingeschlossen bleiben. Mitsamt den diversen Gasen, aus denen die Luft besteht. Unter ihnen: Kohlendioxid.

Auf die Idee, diese Luftblasen zu untersuchen, ist Lorius zehn Jahre zuvor gekommen, als er mit Kollegen auf eine gelungene Arbeit anstiess: mit gletschereisgekühltem Whisky, in dem sich kleine Bläschen gebildet hatten.

Endlich in die Tat umgesetzt, gewähren die Bohrungen Lorius nun einen einmaligen Blick in die Klimageschichte. Die Analyse des Antarktiseises belegt, was Forscher schon lange vermutet haben: Temperatur und CO_2-Konzentration zeigen klare Parallelen. War es auf der Erde warm, war viel Kohlendioxid in der Luft – und umgekehrt. Die Erkenntnisse sind ein weiterer Beleg für die Tendenz des Klimas, bereits auf kleine atmosphärische Veränderungen mit grossen Temperaturschwankungen zu reagieren.

Eine neue Welt

Dass sich das Klima wegen eines kleinen bisschen Gases so stark verändern könnte, war lange Zeit unvorstellbar gewesen. Doch im Verlauf des 20. Jahrhunderts widerlegt die Forschung das Bild, wonach die Atmosphäre ein stabiles Gebilde ist, das kaum aus dem Gleichgewicht gebracht werden kann.

Der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre, die Schnee- und Eisflächen, die Ozeane, die Temperatur: All dies steht zueinander in Wechselwirkung. Einmal ausgelöst, kann sich die Erderwärmung von selbst verstärken. Nichts ist statisch im Klimasystem der Erde: Alles verändert sich, manchmal rasant.

In den 1980er-Jahren, als Lorius in der Antarktis seine Messungen macht, hat sich die Erdatmosphäre gegenüber der Zeit vor der industriellen Revolution bereits markant verändert. Die CO_2-Konzentration in der Luft ist gestiegen: von einstmals 292 auf inzwischen über 340 Teile pro Million. Das entspricht etwa der Hälfte des Unterschieds zwischen einer Eis- und einer Warmzeit.

Dieser menschengemachte Anstieg – ein industrieller Schmetterlingsschlag sozusagen – reicht aus, um die Erde in eine neue, unbekannte Welt

zu verwandeln. Mit dem Klima ist es fast wie mit der Chaostheorie: Eine kleine Begegnung mit der menschlichen Spezies genügt – und alles wird anders.

Der vierte Teil der Serie beleuchtet, wie der Klimawandel von einer wissenschaftlichen Frage zu einer politisch umkämpften Angelegenheit wird.

Der Autor

Arian Bastani hat Klimawissenschaften an der ETH Zürich studiert. Er arbeitet als freischaffender Wissenschaftsjournalist und Illustrator.