

An aerial photograph of a terraced vineyard in a mountainous region. The vineyard is the central focus, showing rows of grapevines planted on the slopes of a hill. The surrounding landscape is rugged and forested, with a winding road visible in the upper left. The overall scene is captured in a high-angle, top-down perspective.

# WAS DIE ATMOSPHERE BEEINFLUSST

# Erderwärmung: erst Verheißung, dann Bedrohung

Von der Erforschung des Treibhauseffekts bis zum Pariser Klimaabkommen

von Markus Bernards

Knapp 200 Jahre vergingen zwischen der Entdeckung des Treibhauseffekts bis zu den heutigen Klimamodellen. Ein Streifzug durch die Geschichte der Klimawandelforschung, die sich schließlich in der Weltpolitik Gehör verschaffte.

Ohne Treibhausgase wäre es auf unserem Planeten bitterkalt. Leben wäre nahezu unmöglich bei mittleren Temperaturen von minus 18 Grad Celsius. Dass wir unser mildes Klima, bei dem der Großteil des Wassers flüssig ist, dem Treibhauseffekt verdanken, kam als Erstem dem französischen Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier in den Sinn. Er machte sich 1824 darüber Gedanken, wie unsere Erde mit durchschnittlich 14 Grad Celsius so angenehm temperiert sein kann, wo doch die Sonne nur aus so ungeheuer großer Entfernung ihre wärmenden Strahlen auf die Erde schickt. Rund 70 Jahre später stellte der Chemiker und spätere Nobelpreisträger Svante Arrhenius aus Schweden eine Theorie vor, der zufolge der Treibhauseffekt durch das Gas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) hervorgerufen werde. CO<sub>2</sub> lasse zwar das kurzwellige Sonnenlicht durch die Atmosphäre, absorbiere aber das von der erwärmten Erde zurückgeworfene langwellige Infrarotlicht. Damit führe CO<sub>2</sub> zur Aufheizung der Atmosphäre. Auch verstärke Wasserdampf, so Arrhenius, den Effekt des Kohlendioxids. Heute ist die damals nur in engen Fachkreisen diskutierte Theorie bestätigt, und bestätigt hat sich auch, was Svante Arrhenius voraussagte für den ungebremsten Verbrauch von Kohle, Öl und Gas: dass nämlich die steigende CO<sub>2</sub>-Menge in der Atmosphäre zu einer deutlichen Temperaturerhöhung führen werde. Falsch lag er aller-

dings mit seiner Schlussfolgerung, denn er sah die Temperaturerhöhung sehr positiv: »Der Anstieg des CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre wird zukünftigen Menschen erlauben, unter einem wärmeren Himmel zu leben.«

Heute ist der angenehme »wärmere Himmel« bedrohlichen Szenarien der globalen Erwärmung gewichen. 2018 listet der fünfte Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaveränderungen (Weltklimarat IPCC) in seiner Zusammenfassung weltweiter Forschungsergebnisse die Vorhersagen für eine weitere Erderwärmung auf: Mit steigendem Meeresspiegel werden Küstenstädte und Inseln versinken, Dürren in vielen Regionen die Ernten mindern und das Wasser knapp werden lassen, andernorts oder zu anderen Zeiten werden Starkregenfälle das Land überfluten, dazu wird es Wald- und Flächenbrände und immer heftigere tropische Stürme geben. Den Grund nennt der Atmosphärenforscher Joachim Curtius von der Goethe-Universität: »Die Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre ändern sich so schnell, dass sich auch das Klima schnell ändert und sich weder Ökosysteme noch der Mensch so schnell anpassen können.«

## 1979: Erste Weltklimakonferenz in Genf

CO<sub>2</sub> kommt in unserer Luft zwar nur zu 0,04 Prozent vor – bei 78 Prozent Stickstoff, 21 Prozent Sauerstoff und einem knappen Prozent des

Der am stärksten entwaldete Teil Amazoniens ist der brasilianische Bundesstaat Rondônia an der Grenze zu Bolivien. Regenwaldrodungen sind nach dem Verbrennen fossiler Rohstoffe die zweitgrößte Quelle für CO<sub>2</sub> und bedrohen zudem die Biodiversität.

Edelgases Argon –, ist aber der Haupttreiber des Klimawandels. Bis sich diese Erkenntnis durchsetzte, vergingen nach Arrhenius' Berechnungen noch mehrere Jahrzehnte. 1938, kurz vor Ausbruch des Zweiten Weltkriegs, berechnete der britische Chemiker Guy Callendar, dass es in den 50 Jahren zuvor einen globalen Temperaturanstieg gab und dass dieser mit dem CO<sub>2</sub>-Anstieg korreliert. Seinen wissenschaftlichen Aufsatz las in Deutschland der Klimatologe Hermann Flohn und war so tief beeindruckt davon, dass er sich in seiner Habilitation drei Jahre

World Meteorological Organisation der Vereinten Nationen acht Jahre später zur ersten Weltklimakonferenz nach Genf, die das internationale Weltklima-Forschungsprogramm in Gang setzte. In den USA, Frankreich und Russland starteten intensive Arbeiten, in Deutschland allerdings fanden sich auch drei Jahre später noch kaum Forschungsgelder für das Thema – der Transrapid sei dem Forschungsminister wichtiger, bemerkte Flohn 1982 bissig in der Sonderausgabe »Wetter« der Zeitschrift Geo. In den folgenden Jahrzehnten gewann das Thema



darauf mit der Möglichkeit eines menschengemachten (anthropogenen) Klimawandels auseinandersetzte. Später wurde Flohn zum wissenschaftlichen Vorreiter des Themas in Deutschland. Er war 1971 bei einer internationalen Konferenz auf einer Insel vor Stockholm dabei,

wo rund 60 Fachleute aus 20 Ländern den anthropogenen Klimawandel sehr kontrovers diskutierten. Hermann Flohn sagte später über diese Konferenz: »Wir waren alle der Überzeugung, dass wir diesem Problem unbedingt nachgehen mussten, dass es aber völlig verfrüht sei, darüber etwas zu sagen.«

Doch die Ergebnisse der dreiwöchigen Klausurtagung fanden in Fachkreisen ein breites Echo, und so lud die

allerdings auch in den deutschen Forschungsetats langsam an Priorität.

Als 1988 der Weltklimarat IPCC gegründet wurde, waren die Klimamodelle schon so ausgereift, dass der IPCC seinen ersten Sachstandsbericht 1990 mit den Worten begann: »Wir sind sicher, dass durch menschliche Aktivitäten verursachte Emissionen substanziell die Konzentrationen der Treibhausgase CO<sub>2</sub>, Methan, Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe [FCKW] und Stickoxide in der Atmosphäre erhöhen. Diese Erhöhungen werden den Treibhauseffekt verstärken und im Durchschnitt die Erdoberfläche weiter erwärmen.« Die Wissenschaftler sagten damals voraus, was wir heute nachmessen können: Den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um rund 0,2 Grad Celsius pro Jahrzehnt. Nur bei der Abschätzung, wie schnell konkrete Folgen eintreffen würden, lehnten sie sich zu weit aus dem Fenster. 2014 legte daher der »Cicero« den Finger in die Wunde und titelte: »An der Realität vorbeiprognostiziert«, weil die 1990 vorhergesagten 50 Millionen Klimaflüchtlinge sich nicht auf den Weg gemacht hat-

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Natürliche Treibhausgase haben das Leben auf der Erde ermöglicht.
- Vor allem durch die Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus fossilen Ressourcen steigt die Temperatur schneller, als es die Ökosysteme der Erde verkraften.
- Um den Klimawandel auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, müssen die weltweiten Emissionen innerhalb weniger Jahre drastisch reduziert werden.

ten, das Artensterben überwiegend nicht dem Klimawandel zugeordnet werden konnte und der IPCC die berechneten wirtschaftlichen Einbußen infolge des Klimawandels nach unten korrigieren musste. Die Ereignisse der folgenden Jahre allerdings zeichnen ein anderes Bild: Die trockenen und heißen Sommer 2018 und 2019 und die Waldbrände der vergangenen Jahre haben weltweit nicht nur ökologische, sondern auch große wirtschaftliche Schäden angerichtet. Rückversicherer zählen den Klimawandel nicht nur infolge vermehrter Wald-

hauseffekt gibt und dass wir bei zwei, drei oder vier Grad Erwärmung einen vollkommen anderen Planeten haben werden, daran gibt es keinen Grund zu zweifeln.«

Wenn Permafrostböden auftauen, könnte das einer der Kippunkte des Klimawandels sein, wo eine kleine Temperaturänderung um durchschnittlich ein halbes Grad große Folgen nach sich zieht, in diesem Fall eine plötzliche Freisetzung großer Mengen an Treibhausgasen. Ein anderer Kippunkt steht womöglich unmittelbar bevor: das Korallensterben. Sichtbar wird



brände, sondern auch durch Ernteausfälle, Starkregen und Stürme zu den drei größten Geschäftsrisiken. Und 2019 schätzte der Weltbiodiversitätsrat IPBES, dass eine Million Arten vom Aussterben bedroht sind. Die vermehrte Landnutzung ist die Hauptursache, wird jedoch vom Klimawandel verstärkt.

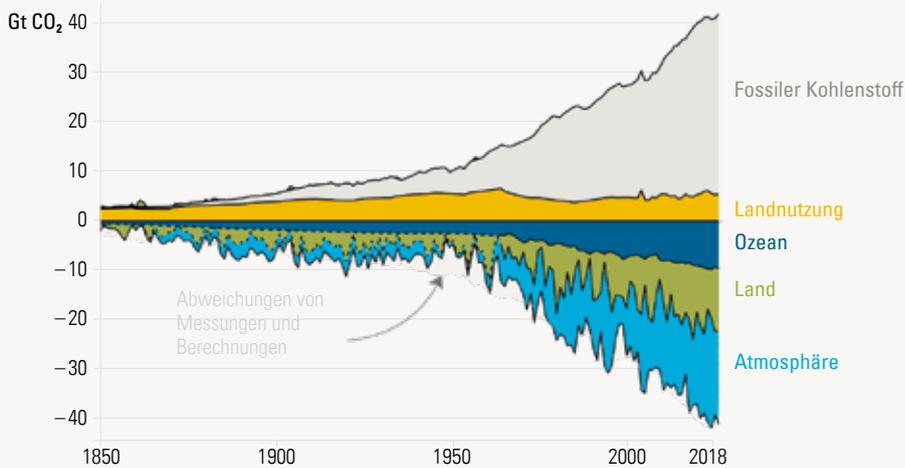
### **Korallen: Wenn Ökosysteme kippen**

Gleichwohl sind Modelle, die Vorhersagen über die Auswirkungen des Klimawandels machen, sehr schwierig, weiß auch Joachim Curtius: »Bestimmte Rückkopplungen sind noch nicht so gut beschrieben, wie wir sie gerne beschreiben würden. Zum Beispiel wissen wir nicht, wie viel CO<sub>2</sub> und Methan aus auftauenden Permafrostböden freigesetzt würde. Auch darüber, ob und wie sich beispielsweise die Zugbahnen von Tiefdruckgebieten verändern, oder ob blockierende Hochdruckgebiete über Europa häufiger werden, wüssten wir gerne noch viel mehr.« Gleichzeitig ist er sich aber sicher: »Die grundsätzliche Physik haben wir sehr, sehr gut verstanden. Dass es also überhaupt einen Treib-

dieses Sterben als Korallenbleiche, bei der die Korallenpolypen die einzelligen Algen ausstoßen, mit denen sie leben, weil die Algen bei zu hohen Wassertemperaturen Giftstoffe produzieren. Eine kurze Zeit kommen die Korallen ohne ihre Algen-Partner aus. Wenn sich das Wasser dann nicht abkühlt, sterben sie ab. 2020 wurde so ein Viertel des Great Barrier Reef vor Australien schwer geschädigt, es war nach 2016 und 2017 die dritte Korallenbleiche dieses größten Korallenriffs der Erde innerhalb weniger Jahre. Ob die Wissenschaftler des Hawai'i Institute of Marine Biology der University of Hawai'i mit ihren Versuchen, wärmeresistente Korallen zu züchten, schneller als die weiterhin steigenden Temperaturen sind, ist fraglich. Denn »wir haben bereits fünfzig Prozent der Korallenriffe der Erde verloren«, sagt die Institutsdirektorin Ruth Gates. Die Korallenriffe, wegen ihrer Artenvielfalt auch »Regenwälder des Meeres« genannt, werden nicht nur durch lange Perioden mit höheren Wassertemperaturen – ein bis zwei Grad reichen schon aus – bedroht. Auch häufigere Stürme und die Versauerung der Ozeane

Die Erderwärmung zeigt sich eindrucksvoll am Rückzug der Gletscher: Der Pedersen Gletscher in Alaska hat sich zwischen 1940 (linkes Bild) und 2005 um zwei Kilometer von der Aialik-Bucht zurückgezogen. Die einstige Lagune ist mit Sedimenten gefüllt und mit Gras und Büschen bewachsen.

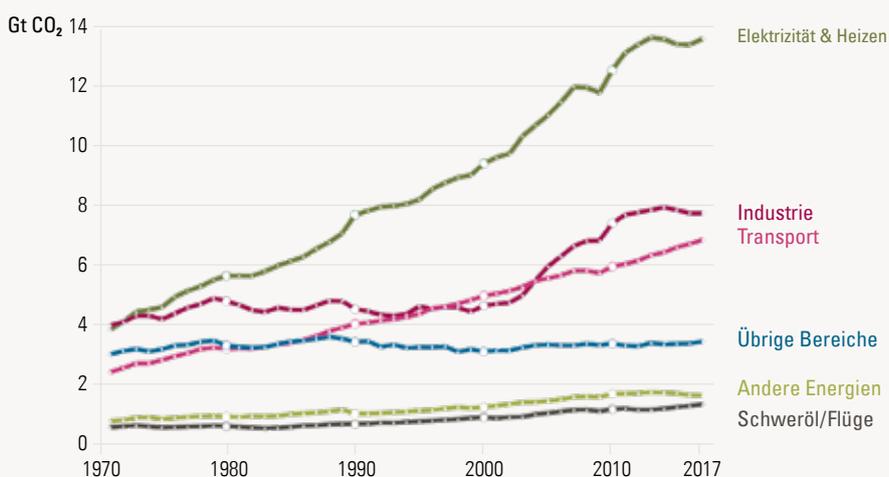
## Die CO<sub>2</sub>-Balance



Quelle: CDIAC; NOAA-ESRL; Houghton and Nassikas 2017; Hansis et al 2015; Joos et al 2013; Khatiwala et al. 2013; DeVries 2014; Friedlingstein et al 2019; Global Carbon Budget 2019.

Fossile Brennstoffe und veränderte Landnutzung – hauptsächlich die Rodung der Regenwälder – haben die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1850 und 2018 bis auf knapp 40 Gigatonnen ansteigen lassen (oberhalb der Null-Linie). Nicht alle Emissionen bleiben in der Atmosphäre: Ozeane nehmen CO<sub>2</sub> auf. Der größte Teil wird als Kohlensäure gelöst und trägt zur Versauerung bei. An Land wird CO<sub>2</sub> durch Wälder, Moore, Humus, Grasland und bei der Gesteinsverwitterung gebildeten Kalk gespeichert.

## CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Energien nach Bereichen



Quelle: IEA 2019; Peters et al 2019; Global Carbon Budget 2019.

CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen werden laut Global Carbon Project 2017 weltweit zu 45 Prozent für Elektrizität und Heizen erzeugt, zu 23 Prozent von der Industrie, zu 19 Prozent durch nationalen Verkehr und zu 3,5 Prozent durch den internationalen Flugverkehr und den Schwerölverbrauch von Schiffen. Die übrigen Bereiche machen knapp 10 Prozent aus.

85 Prozent der 720 Millionen Tonnen Treibhausgase, mit denen Deutschland 2018 die Atmosphäre aufheizte, entstanden laut Umweltbundesamt bei der Erzeugung von Energie. Die Hälfte davon entfiel auf Strom- und Wärmeproduktion, gefolgt von Verkehr (20 Prozent), Industrie (15 Prozent) und Gewerbe, Handel und Dienstleister (5 Prozent).



setzen ihnen zu, da sich CO<sub>2</sub> im Wasser als Kohlensäure löst.

### Die Reaktion der Politik

Auf der Agenda der Weltpolitik steht der Klimawandel seit 30 Jahren. Den Aufschlag machte die UN-Konferenz in Rio de Janeiro 1992, wo die Weltgemeinschaft einen Paradigmenwechsel vollzog: Umweltschutz wurde als gleichwertiges Ziel neben die Armutsbekämpfung und die soziale Gerechtigkeit gesetzt. Freiwillig wollten die Staaten Treibhausgas-Emissionen reduzieren. Im Kyoto-Protokoll 1997 verpflichteten sich dann alle Industrieländer bis auf die USA, die jährlichen Treibhausgas-Emissionen auf mindestens fünf Prozent unter die Werte von 1990 zu senken. Viele Jahre und etliche Konferenzen lang ging es nicht weiter, bis sich die Staatengemeinschaft 2015 im Pariser Abkommen darauf einigte, die Erderwärmung auf unter 2 Grad Celsius zu halten und möglichst auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen.

Um dieses Ziel zu erreichen, darf die Menschheit, so haben Klimaforscher ausgerechnet, nicht mehr als weitere 700 Gigatonnen CO<sub>2</sub> ausstoßen. Das ist angesichts der jährlichen Emissionen von 35 Gigatonnen CO<sub>2</sub> über die Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Zementherstellung nicht allzu viel, zumal die konkreten Reduktionsziele des Pariser Abkommens nicht ausreichen werden. Joachim Curtius:

»Wenn alle Staaten ihre Selbstverpflichtungen von Paris vollständig einhalten, landen wir immer noch bei etwa 3 Grad Erwärmung im Jahr 2100 und damit bei deutlich mehr, als die Erde verkraften kann. Wir haben ein extremes Zeitproblem: 1,5 Grad Erwärmung sind bei den jetzigen Emissionstrends bereits 2040 erreicht.«

Es ist also höchste Zeit für drastische Reduktionen des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Die Vereinten Nationen haben im November 2020 daher zum »Race to Zero [Emissions]« aufgerufen. Auch Joachim Curtius von der Goethe-Universität beteiligt sich als »Scientist for Future« am Warnruf der Wissenschaft an die Weltgemeinschaft: »Bei der Klimakrise sehe ich die Gefahr, dass wir wegen der großen Zeitverzögerung, mit der das Klima auf die Treibhausgas-einträge reagiert, die Folgen erst zu spät am eigenen Leib erfahren. Eine unter vielen Herausforderungen ist es, Staaten und große Unternehmen davon zu überzeugen, Kohle, Erdöl und Gas nicht weiter zu fördern. Die 700 Gigatonnen sind viel, viel weniger, als die geschätzten Rohstoffvorkommen an CO<sub>2</sub> freisetzen würden. Deshalb müssen wir es schaffen, Staaten und Unternehmen davon zu überzeugen, die fossilen Energiereserven im Boden zu lassen.« ●

### Zur Person

**Prof. Dr. Joachim Curtius** ist Professor für Experimentelle Atmosphärenforschung am Institut für Atmosphäre und Umwelt der Goethe-Universität. Auf Seite 107 erklärt er, warum er glaubt, dass wir das 1,5-Grad-Ziel der Pariser Klimakonferenz noch erreichen können.

[curtius@ia.uni-frankfurt.de](mailto:curtius@ia.uni-frankfurt.de)



### Der Autor

**Dr. Markus Bernards**, Jahrgang 1968, ist Molekularbiologe, Wissenschaftsjournalist und Redakteur von Forschung Frankfurt.

[bernards@em.uni-frankfurt.de](mailto:bernards@em.uni-frankfurt.de)