

Leseprobe aus:



ISBN: 978-3-499-00442-1

Mehr Informationen zum Buch finden Sie auf www.rowohlt.de.

MARK LYNAS

6 Grad mehr

Die verheerenden Folgen

der Erderwärmung

Aus dem Englischen von
Barbara Steckhan, Carolin Schiml
und Karola Bartsch

ROWOHLT POLARIS

Die englische Originalausgabe erschien 2020 unter dem Titel
«Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency»
bei HarperCollins Publishers Ltd., London

Deutsche Erstausgabe
Veröffentlicht im Rowohlt Taschenbuch Verlag,
Hamburg, März 2021

Copyright © 2021 by Rowohlt Verlag GmbH, Hamburg
«Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency»
Copyright © 2020 by Mark Lynas
Covergestaltung Hauptmann & Kompanie Werbeagentur, Zürich
Satz aus der Bennet Text Three, InDesign,
bei Pinkuin Satz und Datentechnik, Berlin
Druck und Bindung CPI books GmbH, Leck, Germany
ISBN 978-3-499-00442-1

Die Rowohlt Verlage haben sich zu einer nachhaltigen
Buchproduktion verpflichtet. Gemeinsam mit unseren Partnern
und Lieferanten setzen wir uns für eine klimaneutrale
Buchproduktion ein, die den Erwerb von Klimazertifikaten
zur Kompensation des CO₂-Ausstoßes einschließt.

www.klimaneutralerverlag.de



Vorwort

Als ich mit dem Schreiben der ersten Fassung dieses Buchs begann, ging ich noch davon aus, wir könnten den Klimawandel überleben. Heute bin ich mir da nicht mehr so sicher. Wie ich im Folgenden schildern werde, leben wir bereits in einer Welt, die um 1 Grad wärmer ist als die Welt unserer Eltern und Großeltern. Und die 2 Grad Celsius, die das Sozialgefüge der Menschen belasten und eine ganze Reihe natürlicher Ökosysteme wie Regenwälder und Korallenriffe zerstören werden, zeichnen sich bereits bedrohlich am Horizont ab. 3 Grad Erwärmung werden, wie ich mittlerweile überzeugt bin, eine ernste Gefahr für die Stabilität der menschlichen Zivilisation darstellen, während uns bei 4 Grad ein weltweiter Zusammenbruch der menschlichen Gesellschaften droht, begleitet von einer massiven Auslöschung der Biosphäre, wie sie seit zehn oder vielleicht sogar hundert Millionen Jahren auf der Erde nicht mehr stattgefunden hat. Bei 5 Grad erleben wir gewaltige positive Rückkopplungseffekte, die einen Großteil unseres Planeten unbewohnbar machen werden, sodass die Menschen auf eine labile Existenz in kleinen Zufluchtsstätten zurückgeworfen werden. Bei 6 Grad droht eine unaufhaltsame Kettenreaktion, in deren Folge die gesamte Biosphäre absterben könnte und jegliche Lebensform auf der Erde für immer zerstört wäre.

In dem 2015 auf der Pariser UN-Klimakonferenz getroffenen Abkommen verpflichteten sich Politikerinnen und Politiker aus der ganzen Welt, die Erderwärmung auf 1,5 Grad Celsius, höchstens aber auf 2 Grad Celsius zu begrenzen. Entsprechend gehandelt haben sie allerdings nach wie vor nicht. Um das Ziel der 1,5 Grad zu erreichen, müssten wir die Emissionen innerhalb eines Jahrzehnts weltweit nahezu um die Hälfte verringern

und sie bis Mitte dieses Jahrhunderts auf Netto-Null senken. Stattdessen sind die Emissionen seit dem Abkommen Jahr für Jahr auf neue Rekordwerte gestiegen. Viele Länder haben in Paris «freiwillige Selbstverpflichtungen» vorgelegt, doch selbst wenn sie gänzlich umgesetzt würden, wäre die Wirkung auf die Treibhausgasemissionen in der Summe so gering, dass sie uns geradewegs in das 4-Grad-Szenario führen würden. Das ist der Grund, weshalb ich mein 2007 auf Englisch veröffentlichtes Buch *Six Degrees* (Sechs Grad) vollständig überarbeiten und auf den neuesten Stand bringen wollte. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf der ganzen Welt haben in den letzten zwei Jahrzehnten zwar erstaunliche Forschungsarbeit geleistet und wichtige Artikel verfasst, doch aus unerklärlichen Gründen ist die volle Bedeutung ihrer Analysen nicht bis in unser politisches System vorgedrungen. Deshalb werde ich in den einzelnen Kapiteln dieses Buchs ausführlich darstellen, welche Auswirkungen der Temperaturanstieg mit jedem weiteren Grad auf die menschliche Gesellschaft und die Ökosysteme der Erde haben wird. Die Lage ist inzwischen ziemlich verzweifelt, und niemand, der *6 Grad mehr* gelesen hat, wird noch sagen können, er habe nicht gewusst, was auf uns zukommt.

Selbst während der Arbeit an dem aktuellen Buch konnte ich mitverfolgen, wie sich die Situation weiter verschärft. Als ich begann, war Australien ein ganz normales Land. Doch nach den verheerenden Buschbränden, die sich im Januar 2020 im Zuge von Rekordtemperaturen über dem dürregeplagten Land entzündeten, trifft das nicht mehr zu. Millionen von Australierinnen und Australiern lebten wochenlang unter einer Rauchwolke, und 12 Millionen Hektar Busch- und Farmland gingen in den katastrophalen Flächenbränden in Flammen auf. Dass ihnen bis Mai 2020 33 Menschen zum

Opfer fielen, ist schlimm genug, doch außerdem kamen auch eine geschätzte Milliarde von Wildtieren um. Eine Rückkehr zur Normalität ist unmöglich. «Normal» gehört ein für alle Mal der Vergangenheit an. Wohl noch deutlicher wurde uns dies durch die Covid-19-Pandemie vor Augen geführt. Das «normale Leben» verschwand beinahe über Nacht, als sich ganze Nationen in einen strengen Lockdown begaben. Ich weiß noch, wie ich den klaren blauen Himmel bewundert habe – nun nicht mehr durch die üblichen Kondensstreifen der Flugzeuge durchbrochen –, nachdem der Flugverkehr weltweit eingestellt worden war. Die CO₂-Emissionen gingen tatsächlich temporär zurück, doch die Klimakatastrophen setzen sich fort: Im Jahr 2020 formten sich so viele tropische Orkane und Wirbelstürme, dass den Wettervorhersagern die Namen für sie ausgingen.

Zu welchem Zeitpunkt unser Planet die einzelnen Temperaturschwellen überschreiten wird, lässt sich nicht präzise vorhersagen. Grund dafür sind nicht etwa offene, von der Wissenschaft noch nicht geklärte Fragen – obwohl es da einige gibt –, sondern die Tatsache, dass das Fortschreiten der Erderwärmung in diesem Jahrhundert von jenen Entscheidungen abhängt, die die Geschwindigkeit und die Menge unserer Kohlendioxidemissionen bestimmen. Wenn wir so weitermachen wie bisher, werden wir bereits zu Beginn der 2030er Jahre die 2-Grad-Marge erreicht haben, die 3 Grad etwa zur Jahrhundertmitte und 4 Grad ungefähr um 2075. Und sollten dann positive Rückkopplungen (mehr dazu später) wie das Schmelzen des Permafrosts in der Arktis oder ein Kollaps tropischer Regenwälder einsetzen, könnten wir am Ende dieses Jahrhunderts bei 5 oder 6 Grad ankommen. Wenn die Politik hingegen ernsthafte und entschlossene Bemühungen unternimmt, um die Pariser Ziele umzusetzen, und wenn die Vereinigten Staaten

ten in den Kreis der Klimaschützer zurückfinden, könnten wir das Erreichen der 2-Grad-Grenze bis gegen Ende des Jahrhunderts hinausschieben und einen Temperaturanstieg um 3 Grad oder höher vielleicht gänzlich vermeiden.

Angesichts dieser beiden Möglichkeiten muss ich zugeben, dass ich die Zukunft inzwischen leider weitaus düsterer sehe als noch bei Erscheinen der ersten Ausgabe von *Six Degrees*. Damals ging ich davon aus, dass die notwendigen Maßnahmen ergriffen werden würden, wenn nur ausreichend viele Menschen besser über die Realität des Klimawandels informiert wären. Zwar gab es positive Entwicklungen wie den Verzicht einiger Länder auf Kohlekraftwerke und günstigere Preise für erneuerbare Energien, doch all dies wurde durch den Anstieg der Treibhausgasemissionen und einen beunruhigenden Trend zur Leugnung des Klimawandels weit in den Schatten gestellt. Mit Letzterem meine ich weder die Äußerungen einiger US-Politiker, die in ihrer Dummheit den Klimawandel auf Twitter als «Fake News» bezeichnen, noch unseren Rückfall in den Populismus, der für die demokratischen Werte eine ernste Bedrohung darstellt und der auf internationaler Ebene zum ersten Mal seit dem Sieg über Hitler der extremen Rechten zum Anstieg verhalf. (Wie angenehm da rückblickend das Jahr 2007 erscheint!) Nein, ich beziehe mich auf die Art des Leugnens, der wir alle anhängen, der «impliziten Leugnung» der Erderwärmung, die es uns möglich macht, unser Leben weiterzuführen wie gewohnt, ungeachtet der offensichtlichen Folgen, die Klimaforscherinnen und -forscher uns vor Augen halten. Als würden wir ihnen nicht recht glauben.

Denn schließlich ist es - gerade noch - möglich, so zu tun, als würde sich unser Klima nicht erwärmen, als wäre es nichts Außergewöhnliches, mit welcher Geschwin-

digkeit sich gegenwärtig Veränderungen vollziehen, als würden die Temperaturanstiege, die wir erleben, auf irgendwelchen «natürlichen Zyklen» beruhen. Gestützt wird dies von dem Intergovernmental Panel on Climate Change der UNO (IPCC) (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen), dem sogenannten Weltklimarat. In einem Synthesebericht aus dem Jahr 2014 stellt er fest, der menschengemachte Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre sei «äußerst wahrscheinlich» die vorherrschende Ursache für die seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu verzeichnende Erderwärmung.¹

In der Begrifflichkeit des Weltklimarats steht «äußerst wahrscheinlich» für die mathematisch genau bezifferte Wahrscheinlichkeit von 95 bis 100 Prozent. So mit können wir folgern, dass der Klimawandel lediglich mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 Prozent auf entweder natürlichen oder gegenwärtig noch unbekannten Ursachen beruht. Im Jahr 2019 kam ein Team von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern allerdings zu einer anderen Einschätzung. Auf der Grundlage von drei Datensätzen mit atmosphärischen Temperaturmessungen und der Ergebnisse aus Klimamodellen schlossen sie, dass die Erderwärmung lediglich mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 3,5 Millionen auf natürlichen Ursachen beruht.²

Das heißt, die Republikanische Partei in den Vereinigten Staaten hat lediglich zu 0,00003 Prozent recht. So mahnen die Forscherinnen und Forscher denn auch eindringlich: «Die Menschheit kann es sich nicht leisten, derart eindeutige Signale zu ignorieren.»

Das sehe ich auch so. Mit diesem Buch verfolge ich das Anliegen, die wissenschaftlichen Erkenntnisse so verständlich darzulegen, dass niemand mehr auf die Ausrede zurückgreifen kann, man habe es nicht gewusst. Ich habe mich über Jahre hinweg durch lange ver-

gessene glaziologische Aufzeichnungen gekämpft, habe Tage mit der Lektüre kleingedruckter Zitate aus den IPCC-Berichten verbracht. Zugleich habe ich etliche hundert wissenschaftliche Artikel gelesen - um meinen Leserinnen und Lesern diese Mühe zu ersparen. Wenn Sie die Wahrheit über den Klimawandel erfahren wollen, werden Sie sie hier finden. Bei all dem habe ich keinen großen Optimismus, denn dazu besteht wenig Anlass. Aber noch habe ich Hoffnung. Die Hoffnung bleibt, selbst wenn sonst alles verloren scheint. Soll sie uns den Weg in die Zukunft weisen.

1 Grad mehr

Die Schlagzeile des Jahrhunderts

Es war das Jahr 2015. Zwar schaffte es die Meldung in die Schlagzeilen, doch sie hielt sich dort nur ein, zwei Tage, ehe an ihre Stelle wieder die Themen der gewohnten Berichterstattung – Terrorismus, Politik, Sport, Klatsch und Promi-News – traten. Insofern kann man es kaum jemandem verdenken, wenn er die möglicherweise wichtigste Story des bisherigen Jahrhunderts übersehen hat.

Dem Met Office, dem meteorologischen Dienst Großbritanniens, ist es jedenfalls hoch anzurechnen, dass es eine Pressemitteilung herausgab. Darin hieß es: «Zum ersten Mal soll die globale Durchschnittstemperatur an der Erdoberfläche auf 1 Grad Celsius über die in vorindustrieller Zeit herrschenden Temperaturen steigen» («vorindustriell» definierte der Metereologische Dienst als die Jahre zwischen 1850 und 1900). Die Aktivitäten der Menschen hätten eine globale Erwärmung bewirkt, die über das hinausgehe, was ansonsten die natürliche Temperatur unseres Planeten gewesen wäre. Und nach der wichtigsten Ursache brauche man nicht lange zu suchen: Es reiche ein Blick auf die zwei *Billionen* Tonnen Kohlendioxid (im folgenden CO₂), die seit Beginn der industriellen Revolution im Wesentlichen durch Verbrennung fossiler Energieträger als Gas in die Atmosphäre geleitet wurden.³

Angesichts der bereits bestehenden Erwärmung von 1 Grad sind einige Ausflüge in die Geschichte angebracht. In kaum mehr als einem Jahrhundert hat die Menschheit durch den ungehemmten Verbrauch fossiler Brennstoffe die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf einen Wert gebracht, wie er zuletzt im Pliozän vor ungefähr drei bis fünf Millionen Jahren galt. Als Konsequenz steht zu erwarten, dass die globalen Oberflä-

chentemperaturen noch auf lange Zeit ansteigen werden. Denn die thermische Trägheit – jene hunderte bis tausend Jahre, die es dauern wird, bis sich die tiefsten Schichten der Weltmeere erwärmt haben und die immense Masse der grönländischen und antarktischen Eisdecke geschmolzen ist – hat zur Folge, dass der Temperaturanstieg deutlich hinter der «Antriebskraft» der erhöhten Treibhausgasemissionen hinterherhinkt. Wie wir bald sehen werden, steht uns noch einiges bevor.

Ein Großteil der globalen Erwärmung wird durch Erhöhung des Wärmegehalts der Weltmeere aufgenommen.⁴ Die letzten, im Jahr 2019 vom Weltklimarat veröffentlichten Schätzungen beziffern die in den oberen Ozeanschichten angesammelte zusätzliche Energie auf ungefähr 6 Zettajoule jährlich.⁵ Der Vorsatz «Zetta» steht für eine beachtliche Größenordnung: 6 hoch 21 bedeutet eine 6 mit 21 Nullen, also 6 000 000 000 000 000 000 000 Joule. Wir Menschen verbrauchen im Vergleich weltweit insgesamt etwa ein halbes Zettajoule pro Jahr.⁶ Besser lässt sich diese zusätzliche Energie vielleicht anhand eines viel drastischeren Beispiels illustrieren, nämlich der von der Atombombe in Hiroshima freigesetzten Hitze.⁷ 6 Zettajoule Energie bedeuten, dass in jeder Sekunde drei Hiroshima-Atombomben in unseren Weltmeeren explodieren. Man zähle nur einmal mit: drei, sechs, neun, zwölf, fünfzehn, achtzehn ...

Ende November 2018 wurde die vorläufige Einschätzung des Metereologischen Diensts Großbritanniens von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) bestätigt. Auf Grundlage von fünf unabhängig voneinander geführten Datensätzen zur globalen Temperatur kam sie in ihrem jährlichen Klima-Zustandsbericht zu dem Schluss, dass die globalen Durchschnittstemperaturen zwischen 2014 und 2018 um 1,04 Grad Celsius höher waren als die Temperaturen in vorindustrieller Zeit.⁸ Das heißt,

dass wir jetzt tatsächlich in einer um 1 Grad wärmeren Welt angekommen sind. Für mich war diese Erklärung besonders denkwürdig, denn als ich vor fast fünfzehn Jahren an der ersten Fassung dieses Buches *Six Degrees* arbeitete, lag die 1-Grad-Schwelle noch in der Zukunft. Nun aber scheint es, als seien wir ein Kapitel nach vorn gestürmt: Die Zukunft von damals ist jetzt Gegenwart. Wenn es uns nicht gelingt, die Kohlenstoffemissionen rechtzeitig zu reduzieren, werden irgendwann auch die in den folgenden Kapiteln geschilderten, immer schrecklicheren Auswirkungen einer Erwärmung - um 2, 3, 4 und noch mehr Grad - gegenwärtig sein. Dies ist unsere letzte Warnung.

Die Aussicht von Mauna Loa

Mauna Loa ist ein riesiger Schildvulkan auf Big Island, der größten Inselgruppe von Hawaii, und so hoch, dass sein Gipfel die meiste Zeit über das sichtbare Wettergeschehen auf der Insel hinausragt. Auf seiner Ostseite empfängt er die Passatwinde, und wenn sie an seinen Hängen nach oben geleitet werden, kühlen sie sich ab, bilden Wolken und erzeugen Fluten tropischer Regenfälle. Hilo, die größte Stadt der Insel, wird dadurch zu einer der niederschlagsreichsten Ortschaften der Vereinigten Staaten. Auf der langen Fahrt nach oben inmitten der erstarrten Lavaflüsse lässt man die Regenwolken jedoch bald weit hinter sich. Die Verhältnisse in Gipfelnähe ähneln denen von subpolaren Zonen mit nur wenigen Zentimetern jährlicher Niederschläge, häufig in Form von Schnee.

Die befestigte Straße endet in 3200 Metern Höhe auf dem vulkanischen Geröll bei einer Gruppe alter Gebäude, die gemeinsam die Mauna-Loa-Messstation bilden. Das Observatorium liegt tiefer als die Sonnenteleskope auf dem 4207 Meter hohen Gipfel des Nachbarvulkans Mauna Kea, die 40 Kilometer weiter nördlich über den Wolken zu schweben scheinen. Es hat jedoch, wie sich aus eher irdischer Perspektive argumentieren ließe, die größere geschichtliche Bedeutung. Denn auf dem Mauna Loa begann der Chemiker und Klimaforscher Charles Keeling, offenbar aus einer Laune heraus und mit mäßiger Unterstützung von offizieller Seite, im Jahr 1958 mit seinen Messungen des CO₂-Gehalts der Luft.⁹ Dabei benutzte er wegweisende, von ihm selbst entwickelte Geräte.

Keeling hatte herausgefunden, dass Messungen in tieferen Atmosphärenschichten kaum aussagekräftig

waren, da der CO₂-Gehalt aufgrund von Autoabgasen, Emissionen aus Industrieanlagen, Vegetationswachstum und anderem ständig schwankte. Der Mauna Loa aber ließ diese alltäglichen Störfaktoren dank seiner Höhe weit unter sich, und Keeling konnte mit seinen weltweit erstmaligen Messungen zeigen, dass die Konzentration an CO₂, das sich in hohen Luftsichten in die gesamte Erdatmosphäre mischt, insgesamt kontinuierlich anstieg. Dies bildete er in einer - gemäß den jahreszeitlichen Schwankungen im Zickzack - ansteigenden Graphik ab, die bald als Keeling-Kurve (und wohl berühmteste graphische Darstellung der Erderwärmung aller Zeiten) bekannt wurde. Charles Keeling starb 2005, doch glücklicherweise wird diese Arbeit von seinem Sohn Ralph - ebenfalls ein Chemiker und Klimaforscher - fortgeführt.¹⁰ Ralph Keeling machte eigene Entdeckungen, etwa dass der Sauerstoffgehalt der Luft parallel zu unserem erhöhten Verbrauch fossiler Brennstoffe stetig sinkt, da der in der Luft befindliche Sauerstoff (O₂) durch die Reaktion mit dem aus der Erde geförderten Kohlenstoff in CO₂ gebunden wird.

Als Charles Keeling 1958 mit seinen Messungen begann, lag die Kohlendioxidkonzentration in der dünnen Luft über den Lavafeldern des Mauna Loa bei 315 *parts per million* (ppm) und damit bereits deutlich über den 278 ppm in vorindustrieller Zeit.¹¹ Am 10. Mai 2013 gab die für die Forschungsstation zuständige Scripps Institution for Oceanography die denkwürdige Meldung heraus, dass der CO₂-Gehalt zum ersten Mal in der Menschheitsgeschichte kurzfristig über die Schwelle von 400 ppm gestiegen war. «Dass der CO₂-Wert [dauerhaft] über 400 ppm liegen wird, lässt sich nicht mehr aufhalten», lautete Ralph Keelings trauriger Kommentar. «Damit müssen wir uns abfinden. Entscheidend für das Klima ist jedoch, was von nun an geschieht, und dies haben

wir immer noch in der Hand. Im Wesentlichen kommt es darauf an, in welchem Maße wir uns bei der Energieerzeugung weiterhin auf fossile Brennstoffe stützen.»¹² Offenbar hat niemand auf ihn gehört, denn beim Verfassen dieses Manuskripts lag der atmosphärische CO₂-Gehalt bei 408 ppm, eine Zahl, die schon wieder überholt sein wird, wenn Sie dies lesen. Das ständige Ansteigen der Keeling-Kurve lässt sich auf Twitter live unter @Keeling_curve mitverfolgen.

Die Keeling-Kurve führt uns zweifelsfrei vor Augen, was sich in all dem konfusen Gerede der Klima- und Energiedebatten nicht von der Hand weisen lässt. Im Gegensatz zu den Hängen des gewaltigen Vulkans, auf dessen Gipfel sie gemessen wird, verläuft sie nach anfänglich sanftem Anstieg immer steiler nach oben. Was zeigt, dass die Anreicherung der Atmosphäre mit CO₂ stetig rascher wird, von rund 1 ppm Steigerung in den ersten Jahren bis auf heute etwa 2 ppm pro Jahr. Es gibt keinerlei Anzeichen für eine Verlangsamung, keinen plötzlichen Abfall, hervorgerufen etwa durch die Verabschiedung des Kyoto-Protokolls und schon gar nicht durch die 2009 in Kopenhagen getroffene «Zwei-Grad-Verpflichtung» oder auch das wegweisende Übereinkommen von Paris im Jahr 2015. Die Staatsoberhäupter, die sich lächelnd die Hände schütteln, die Diplomaten, die sich nach nächtelangen Verhandlungs marathons auf dem Podium umarmen, haben samt und sonders keinen erkennbaren Einfluss auf die Keeling-Kurve gehabt – und sie ist das Einzige, was für die Temperatur unseres Planeten wirklich zählt. Unsere Solaranlagen, Windturbinen, Elektroautos, Lithiumionen-Batterien, LED-Birnen, Atomkraftwerke, Biogasanlagen, Pressekonferenzen, Erklärungen, Artikel aller Art; unsere lautstarken Debatten, unsere leidenschaftlichen Demonstrationen, alles Informieren und Ignorieren, Aufklären und Zurück-

weisen, unsere Reden, Filme und Internetseiten, Vorträge und Bücher, unsere Absichtserklärungen und CO₂-Neutralitätsziele, unsere Augenblicke der Freude und Verzweiflung – all dies hat bis heute nicht die kleinste Kerbe in die immer steilere Keeling-Kurve geschlagen.

Dies heißt jedoch nicht, dass wir dem Schicksal hilflos ausgeliefert sind. Kein Trend hält sich ewig, und dass etwas in jüngster Vergangenheit so war, muss nicht heißen, dass es auch in Zukunft so bleibt. Die Emissionen sind nichts Extraterrestrisches, sondern das Ergebnis unserer Alltagshandlungen – und letztlich eine unausweichliche Folge unserer modernen Zivilisation. Über ihren Ursprung und ihr ganzes Ausmaß informiert uns der jährliche Bericht des Global Carbon Project.¹³ Durchschnittlich wurden in der letzten Dekade von uns Menschen Jahr für Jahr 35 Milliarden Tonnen CO₂ aus geologischen Vorkommen (also Kohle, Erdöl und Gas) in die Atmosphäre befördert. Hinzu kamen 6 Milliarden Tonnen CO₂ aus der «Landnutzungsänderung» (Entwaldung, Rodungen für die Landwirtschaft und Ähnliches). Etwa 9 Milliarden Tonnen dieses zusätzlichen Kohlendioxids wurden von den Weltmeeren aufgenommen und 12 Milliarden von der Vegetation und den Böden. Zurück blieben also circa 18 Milliarden Tonnen, die sich in der Atmosphäre ansammelten und den unablässigen Anstieg der Keeling-Kurve vorantrieben (die Differenz von 2 Milliarden Tonnen erklärt sich durch Unsicherheitsfaktoren in der Kalkulation).

Gelegentlich gibt es im Verhältnis zum Vorjahr kleinere Abweichungen im Kohlenstoffbudget, die mitunter begeistert registriert werden. In den Jahren 2014, 2015 und 2016 beispielsweise war so gut wie keine jährliche Erhöhung der auf fossilen Brennstoffen beruhenden Emissionen zu verzeichnen. Da es zum ersten Mal so schien, als seien sie stabil, sah man Grund zum

Feiern. Doch nachdem der Eindruck entstanden war, die Menschheit hätte den Höhepunkt ihrer Emissionen überschritten, nahm deren Menge 2017 wieder zu und erreichte mit 36,8 Milliarden Tonnen einen neuen Rekordwert – und das, obwohl allein im Jahr 2016 Anlagen zur Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien mit der bislang nie dagewesenen Kapazität von 161 Gigawatt gebaut worden waren. Trotzdem waren die Emissionen 2018 um fast 3 Prozent höher als im Vorjahr. 2019 lag der Wert mit 0,6 Prozent nur leicht über dem von 2018, da die Nutzung von Kohle in den Vereinigten Staaten und Europa eingeschränkt worden war. Doch was wir – dringend – brauchen, ist eine *Reduzierung der Kohlendioxidemissionen* und nicht die Verringerung ihres Anstiegs.

Wo also hakt es? Nun, letztlich ist es eine Frage der Größenordnung. Die Welt giert nach immer mehr Strom: Die Nachfrage nach Primärenergie steigt stetig, und 80 Prozent dieser Energie wird durch die unentwegt zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe erzeugt.¹⁴ Weltweit betrug der Anteil erneuerbarer Energien (Wasserkraft nicht eingerechnet) an der gesamten Primärenergie im Jahr 2019 gerade einmal 4 Prozent und ist somit viel zu klein, um dem Aufwärtstrend bei den Gesamtemissionen etwas entgegenzusetzen.¹⁵ Aus diesem Grund haben sich Wind- und Sonnenenergie bislang nicht merklich auf die Keeling-Kurve ausgewirkt. Neuesten Schätzungen zufolge müsste sich die Zubaurate bei sauberer Energie verzehnfachen, um den jährlichen Anstieg bei fossilen Brennstoffen aufzuhalten.¹⁶

Während die Messungen des Observatoriums einen ständigen Anstieg der CO₂-Emissionen verzeichnen, leidet der Mauna Loa selbst unter den Auswirkungen der daraus entstehenden Klimaerwärmung. Das Thermometer klettert immer höher, und Nachtfröste sind seltener

im Vergleich zu der Zeit, als Charles Keeling mit den provisorischen Instrumenten seine Aufzeichnungen begann.¹⁷ Mauna Loas Gipfel mag vielleicht meistenteils das Wettergeschehen überragen, aber der globalen Erwärmung kann letztlich kein Ort auf der Erde entkommen. Schnee fällt seltener – und schmilzt im Frühjahr rascher –, und mit jedem Jahr, das vergeht, verändert sich auf den Hängen des Vulkans die Flora. 1958 musste Charles Keeling seine komplexen und sensiblen Instrumente noch selbst bauen, um die subtilen Veränderungen in unserer Umwelt zu dokumentieren. Heute sind sie mit bloßem Auge sichtbar.

Zurück in die Zukunft

Mit einer Durchschnittstemperatur von knapp einem Grad über den Temperaturen in vorindustrieller Zeit war 2015 das bisher wärmste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn. Aber wie sieht es mit weiter zurückliegenden Perioden aus, als das Thermometer noch nicht erfunden war und niemand Messungen vornahm? Bekanntlich gab es die Kleine Eiszeit zwischen dem 17. und dem frühen 19. Jahrhundert, in der in London die Themse zufror und auf ihrem Eis Frostjahrmarkte stattfanden, oder auch die mittelalterliche Warmzeit, in der die Wikinger Grönland zu ihrer Kolonie machten. Beide Intervalle werden gelegentlich von Klimawandelskeptikern als Beleg dafür angeführt, dass das Klima früher schon Schwankungen unterlegen habe, mit der begleitenden Behauptung, die gegenwärtige Erwärmung sei nicht von uns Menschen verursacht worden (Denkfehler: die Ursache für Klimaveränderungen in der Vergangenheit muss nicht notwendigerweise auch heute gelten) und es bestehe kein Anlass zur Sorge.

2019 erschien in der Zeitschrift *Nature* jedoch ein Artikel, der auf Grundlage weltweiter Klimadaten – Analysen von Korallen, Seesedimenten, Gletschereis, Muschelschalen und Bäumen – überzeugend nachwies, dass es sich bei diesen früheren Temperaturabweichungen um regionale Ereignisse gehandelt hatte, die sich nicht über den gesamten Planeten erstreckten.¹⁸ So ist es zwar eine historische Tatsache, dass vor allem über das 17. und 18. Jahrhundert hinweg auf der Themse immer wieder Frostjahrmarkte stattfanden (aus dieser Zeit stammt auch unser verklärtes Bild von «weißen Weihnachten»), doch standen den kälteren Wintern in Europa wärmere Temperaturen in der westlichen Hälfte Nordamerikas gegenüber, woran sich heute allerdings nie-

mand erinnert. Eine globale Abkühlung fand nicht statt, und ebenso wenig sind die Besetzung Grönlands durch die Wikinger oder der Weinbau der Römer in Britannien Beweise für eine globale Erwärmung in früheren Zeiten. Den vielfältigen Datenquellen nach zu urteilen ist der weltweite Temperaturanstieg unserer Tage tatsächlich ein Phänomen, das es seit mindestens 2000 Jahren nicht gegeben hat.

Wie aber sieht es aus, wenn wir noch weiter als nur zwei Jahrtausende zurückgehen? Eine Studie kommt nach Auswertung von Datensätzen aus 73 verschiedenen Quellen aus der ganzen Welt zu dem Ergebnis, dass es im frühen Holozän vor 10 000 bis 5000 Jahren lediglich ein gutes halbes Grad wärmer war als in vorindustrieller Zeit.¹⁹ Da, verglichen mit damals, die Temperaturen seit 2015 ein ganzes Grad höher sind, können wir schlussfolgern, dass unser Planet mit ziemlicher Sicherheit wärmer ist, als er es jemals seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 18 000 Jahren gewesen war. Eine Entsprechung zu den außergewöhnlichen Werten von heute findet man erst wieder in einer Periode vor der letzten Eiszeit vor 116 000 bis 129 000 Jahren, von der Wissenschaft als Eem-Warmzeit bezeichnet.

In meinem Buch *Six Degrees* war von Untersuchungen zum Klima der Eem-Warmzeit im zweiten Kapitel die Rede, das hauptsächlich die Erwärmung um 2 Grad behandelt. Neuere Studien deuten jedoch darauf hin, dass es im Eem nur etwa 1 Grad wärmer war als im vorindustriellen Holozän. Anders ausgedrückt entsprachen die damaligen globalen Temperaturen ungefähr denen, die wir bereits heute erleben. Trotzdem lassen sich die Verhältnisse der Eem-Zeit nicht mit den unseren vergleichen. Die arktische Waldgrenze verlief viel weiter im Norden, und in den Flüssen Südenglands badeten Flusspferde.²⁰ Da die Menschen damals außerdem noch

in Höhlen lebten, stand der CO₂-Gehalt der Atmosphäre noch auf einem vorindustriellen Wert von rund 270 ppm.²¹ Wie also kam es zu den warmen Temperaturen? Wahrscheinlich lag es an leichten Schwankungen in der Umlaufbahn der Erde, durch die die einströmende Sonnenenergie höhere Breitengrade erwärmte, die Tropen aber kaum veränderte oder verglichen mit heute sogar etwas kühler werden ließ. Untersuchungen von in Seesedimenten erhaltenen Mücken zeigten, dass die Sommertemperaturen in Teilen Grönlands zwischen 5 und 8 Grad Celsius höher waren als heute,²² während das Eis im Nordpolarmeer kaum abgenommen hatte.²³

Die vielleicht unheilvollste Erkenntnis aus der Eem-Warmzeit hängt mit dem Meeresspiegel zusammen. Trotz eines um 135 ppm *geringeren* atmosphärischen CO₂-Gehalts und weltweiter Temperaturen, die in etwa heutigen Mittelwerten entsprechen, war der Meeresspiegel zwischen 6 und 10 Meter höher als heute.²⁴ Zeugnisse aus jener Epoche deuten darauf hin, dass davon rund 5 Meter auf das Schmelzwasser aus dem grönländischen Eisschild entfallen, der bis auf größere, auf der nordöstlichen Landmasse aufliegende Reste zurückging.²⁵ Was das bedeutet, ist klar: Unsere heutigen Temperaturen sind schon jetzt hoch genug, um einen Großteil des grönländischen Eisschilds zum Schmelzen zu bringen und den Meerwasserspiegel um mehrere Meter anzuheben. Das mag schwer nachvollziehbar sein, aber in Grönland kann man förmlich mit ansehen, welche raschen und epochalen Änderungen die einstige Eiswüste erlebt.

Grönlands Seen

Grönland wird zu «Blauland»: Hunderttausende schillernder blauer Seen funkeln in den Sommermonaten neuerdings an den Grenzen des rasch schmelzenden Eisschildes, und angefacht durch die globale Erwärmung schiebt sich die Abschmelzgrenze immer weiter in die Höhen und ins Landesinnere vor.²⁶ Das große Tauen kann dramatische Auswirkungen haben - Ende Juli 2012 strömte so viel Schmelzwasser vom südwestlichen Teil des Eisschildes herab, dass es eine Brücke über den Watson River forttriss, der sich südlich der Siedlung Kangerlussuaq in einen Fjord ergießt. In Videos auf YouTube kann man sehen, wie der grünbraune, reißende Strom einen Traktor mitschleift, ehe er nur wenige Minuten später die Brücke und die zu ihm führende Straße zerstört.

Dieser Vorgang ist mehr als nur ein anschauliches Beispiel. Die Schmelzwasserströme im Watson River sind in den letzten Jahren kontinuierlich angestiegen und heute im Durchschnitt um fast 50 Prozent höher als in den 1950er Jahren.²⁷ Der zerklüftete, von Geröll bedeckte Rand des riesigen Eisschildes liegt nur wenige Kilometer oberhalb des Tals von Kangerlussuaq, und die meisten blauen Seen, von denen sich im Sommer mehrere hundert in jenem Grenzgebiet bilden, entleeren sich in den Watson River. Sein Einzugsgebiet im Südwesten Grönlands ist 12 000 Quadratkilometer groß. Die größten Schmelzwassermengen fielen, im Jahresdurchschnitt gesehen, 2010, 2012 und 2016 an, wobei sich im Juli 2012 eine Rekordschmelze entwickelte, deren dramatische Fluten dann bei Kangerlussuaq die Brücke über den Watson River mitrissen.

Das Auftreten dieses Gletscherstroms zu genau diesem Zeitpunkt lässt sich gut erklären. Zum ersten Mal seit Menschengedenken hatte das Eis sogar auf dem Gip-

fel des gewaltigen Eisschildes in 3216 Meter Höhe zu tauen begonnen. Der Gipfel wird als Kältewüste eingestuft, ein unbewohnbarer Ort mit eisiger, dünner Luft und Schnee, der so trocken ist wie Staub. Am 12. Juli 2012 stiegen die Temperaturen dort jedoch zum ersten Mal seit Aufzeichnungsbeginn über den Gefrierpunkt, und die vor Ort fest angebrachten automatischen Geräte der Wetterstation standen im Schneematsch. Weiter unten, auf der westlichen Seite des Eisschildes, mussten Klimaforscherinnen und -forscher ihr Camp verlegen, als der Schnee und die darunterliegende Eisdecke schmolzen.²⁸ In Nordgrönland war es nicht anders; an sechs aufeinanderfolgenden Tagen maß eine dänische Forschungsgruppe dort zwischen dem 10. und 15. Juli Oberflächentemperaturen über dem Gefrierpunkt. Da es am 11. und 13. Juli sogar regnete, strömte Regen- und Tauwasser in die einst dauerhaft von Schnee bedeckte Landschaft.²⁹

Als die ersten Satellitendaten von der großen Juli-Schmelze 2012 eintrafen, vermuteten die Forscherinnen und Forscher bei den Analysen zunächst einen Defekt in ihren Geräten. Auf späteren Aufnahmen zeigte sich der gesamte Eisschild jedoch in Tiefrot, was für einen anhaltenden Tauvorgang steht. Als die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre Daten dann mit denen anderer Satelliten verglichen, stellten sie fest, dass am 8. Juli auf rund 40 Prozent der Oberfläche des Eisschildes Temperaturen über dem Gefrierpunkt geherrscht hatten. Am 12. Juli lag die Zahl bei 98,6 Prozent. In praktisch ganz Grönland hatte es zu tauen begonnen, was bis dato kein Mitglied der Eisschild-Expertengruppe je erlebt hatte.

Langzeitdaten ergaben, dass es höchst selten zu solchen Schmelzereignissen kommt, die die gesamte Insel erfassen. Ein Artikel von Dezember 2018 stufte das

Schmelzvolumen von 2012 dementsprechend als außergewöhnlich ein und kam zu dem Schluss, dass es «in den vergangenen 6800 bis 7800 Jahren beispiellos» sein dürfte.³⁰ Im selben Artikel war allein für die 20 vorangegangenen Jahre von einer 500-prozentigen Steigerung der Schmelzintensität am Ort der Eiskernbohrungen die Rede. Die jüngsten Daten zeigen, dass die sich am raschesten ausbreitenden Schmelzgebiete sich im nördlichen Teil Grönlands befinden, in der näher am Nordpol gelegenen und daher eigentlich kältesten Zone.³¹

In dem einst fast ausschließlich von Eis und Schnee bedeckten Grönland regnet es nun immer häufiger, selbst im tiefsten Winter.³² Während frisch gefallener Schnee wegen seiner strahlend weißen Farbe einen Großteil der Sonnenstrahlen in den Weltraum zurückwirft, besitzt tauender Schneematsch diese Eigenschaft nur noch zum Teil, und der von Schnee befreite nackte Eisschild ist sogar noch dunkler. In ganz Grönland hat sich die Schneegrenze in die Höhen zurückgezogen, sodass immer größere Flächen unbedeckten Eises der vollen Hitze der Sommersonne ausgesetzt sind.³³ Da sich die Ränder des Eisschildes allmählich ins Landesinnere verschieben, liegen nackte Felsen und Gletschergeröll bloß, und immer häufiger entwickeln sich Staubstürme. Pflanzen sind in neue Gebiete vorgedrungen, und vor dem Hintergrund höherer Frühlingstemperaturen erwachen sie auch eine oder zwei Wochen eher aus ihrem Winterschlaf.

Durch die Eiskernuntersuchungen weiß man seit langem, dass das Klima in Grönland zu plötzlichen und unerklärlichen Wendungen neigt. Vor rund 11 700 Jahren, am Ende einer kälteren Periode namens Jüngere Dryas, schnellten die Temperaturen innerhalb weniger Jahrzehnte um 15 Grad nach oben.³⁴ Ähnliches ereignete sich während der letzten Eiszeit vor 14 761 Jah-

ren, als es zu einer krassen Erwärmung von 9 Grad innerhalb von 70 Jahren kam. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler fürchten, Grönland könne gegenwärtig erneut die Schwelle zu einem dramatischen Klimawandel überschreiten und der gesamte Eisschild nach einer Schmelze über mehrere Jahrhunderte hinweg irgendwann für immer verschwunden sein. Die jährlichen Durchschnittstemperaturen sind bereits um 3 Grad höher als noch vor wenigen Jahrzehnten. Diese Veränderungen vollzogen sich allerdings nicht graduell, sondern in plötzlichen Sprüngen: 1994 waren es 2 Grad und 2006 1,1 Grad.³⁵ Wenn es innerhalb der nächsten Jahrzehnte in diesem Tempo weitergeht, müssen wir uns wohl darauf einstellen, dass das Klima problemlos die großen Kipppunkte der fernen Vergangenheit erreicht.

2019 war ein weiteres Jahr der Extreme. In ganz Grönland stiegen die Temperaturen auf bis zu 12 Grad über den Durchschnittswert des Vorjahres, und der Gipfel des Eisschildes erlebte zwischen dem 30. und 31. Juli 2019 eine neuerliche Schmelze.³⁶ Dieses Mal übertrafen die Wärmegrade auf dem höchsten Punkt des Eisschildes die Rekordwerte von 2012 und blieben länger als zwei Tage über dem Gefrierpunkt. Angesichts dieser raschen Klimaänderungen warnen einige Forscherinnen und Forscher, dass die für das 21. Jahrhundert berechneten Prognosen zum Meeresspiegelanstieg nach oben korrigiert werden müssen. Wie einer von ihnen feststellte, war das gegenwärtige Schmelzvolumen erst für 2070 erwartet worden.³⁷ In *Six Degrees* habe ich Grönlands Beitrag zum Meeresspiegelanstieg noch bei etwa 0,3 Millimeter pro Jahr gesehen, doch nach vorläufigen Schätzungen betrug er im Jahr 2019 1,5 Millimeter und damit das Fünffache.³⁸ Wenn das kein Kipppunkt ist!

[...]

Endnoten

- 1** IPCC: Klimaänderung 2014: Ein Synthesebericht, Hauptautoren (Hg.): Pachauri, R. K. u. Meyer, L. A., Genf, 2014. www.de-ipcc.de/media/content/IP-CC-AR5_SYR_barrierefrei.pdf
- 2** blogs.scientificamerican.com/observations/five-significant-whats-that/
- 3** Dutton, A., u. a.: «Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods», *Science* (6244), aaa4019, 2015, S. 349.
- 4** Cheng, L., u. a.: «How fast are the oceans warming?», *Science* 363 (6423), 2019, S. 128–129.
- 5** IPCC: «Chapter 5: Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities». In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 2019, Hg.: H.-O. Pörtner u. a., S. 5–14.
- 6** Harvey, C.: «The Oceans Are Heating Up Faster Than Expected», Environment and Energy Publishing – E & E News, 2018. www.scientificamerican.com/article/the-oceans-are-heating-up-faster-than-expected/
- 7** Cook, J.: «4 Hiroshima bombs worth of heat per second», Skeptical Science blog, 2013. www.skeptical-science.com/4-Hiroshima-bombs-worth-of-heat-per-second.html. Ich habe Cooks Schätzungen von 6–8 Zettajoule pro Jahr auf die letzten Schätzungen zur Erwärmung der Weltmeere übertragen.
- 8** World Meteorological Organization: «WMO climate statement: past 4 years warmest on record», 2018. <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-climate-statement-past-4-years-warmest-record>
- 9** Keeling, C.: «Rewards and Penalties of Monitoring the Earth», *Annual Review of Energy and the Environment* 23, 1998, S. 25–82.

- 10** Keeling, R.: «Recording Earth's Vital Signs», *Science* 319 (5871), 2008, S. 1771–1772.
- 11** Keeling, C.: «Rewards and Penalties of Monitoring the Earth», 1998. Siehe Abbildung 3.
- 12** Scripps Institution of Oceanography: «Carbon dioxide at Mauna Loa Observatory reaches new milestone: Tops 400 ppm», Pressemitteilung 2013. scripps.ucsd.edu/news/7992
- 13** www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/index.htm
- 14** Jackson, R., u. a.: «Warning signs for stabilizing global CO₂ emissions», *Environmental Research Letters* 12 (11), 110202, 2017.
- 15** BP: *BP Statistical Review of World Energy*, S. 11, 2019. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>
- 16** Pielke jr., R.: «The world is not going to halve carbon emissions by 2030, so now what?», *Forbes*, 2019. <https://www.forbes.com/sites/rogerpielke/2019/10/27/the-world-is-not-going-to-reduce-carbon-dioxide-emissions-by-50-by-2030-now-what/#9845ee437940>
- 17** Malamud, B., u. a.: «Temperature trends at the Mauna Loa observatory, Hawaii», *Climate of the Past* 7, 2011, S. 975–983.
- 18** Neukom, R., u. a.: «No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era», *Nature* 571 (7766), 2019, S. 550–554.
- 19** Marcott, S., u. a.: «A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years», *Science* 339 (6124), 2013, S. 1198–1201.
- 20** Schreve, D.: «A new record of Pleistocene hippopotamus from River Severn terrace deposits, Gloucester,

- UK – palaeoenvironmental setting and stratigraphical significance», *Proceedings of the Geologists' Association* 120 (1), 2009, S. 58–64.
- 21** Pedersen, R., u. a.: «The last interglacial climate: comparing direct and indirect impacts of insolation changes», *Climate Dynamics* 48 (9–10), 2017, S. 3391–3407.
- 22** McFarlin, J., u. a.: «Pronounced summer warming in northwest Greenland during the Holocene and Last Interglacial», *PNAS* 115 (25), 2018, S. 6357–6362.
- 23** Stein, R., u. a.: «Arctic Ocean sea ice cover during the penultimate glacial and the last interglacial», *Nature Communications* 8 (373), 2017, S. 1–13.
- 24** Dutton, A., u. a.: «Sea-level rise due to polar ice-sheet mass loss during past warm periods», 2015.
- 25** Yau, A., u. a.: «Reconstructing the last interglacial at Summit, Greenland: Insights from GISP2», *PNAS* 113 (35), 2015, S. 9710–9715.
- 26** Howat, I., u. a.: «Brief Communication: <Expansion of meltwater lakes on the Greenland Ice Sheet>», *The Cryosphere* 7 (1), 2013, S. 201–204.
- 27** As, D. van: «Reconstructing Greenland Ice Sheet meltwater discharge through the Watson River (1949–2017)», *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 50 (1), e1433799, 2018.
- 28** Goldberg, S.: «Greenland ice sheet melted at unprecedented rate during July», *Guardian*, 24. Juli 2012. <https://www.theguardian.com/environment/2012/jul/24/greenland-ice-sheet-thaw-nasa>
- 29** Nghiem, S., u. a.: «The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012», *Geophysical Research Letters* 39 (20), L20502, 2012.
- 30** Trusel, L., u. a.: «Nonlinear rise in Greenland runoff in response to post-industrial Arctic warming», *Nature* 564 (7734), 2018, S. 104–108.

- 31** Noël, B., u. a.: «Rapid ablation zone expansion amplifies north Greenland mass loss», *Science Advances* 5 (9), eaaw0123, 2019.
- 32** Oltmanns, M., u. a.: «Increased Greenland melt triggered by large-scale, year-round cyclonic moisture intrusions», *The Cryosphere* 13 (3), 2019, S. 815–825.
- 33** Noël, B., u. a.: «Rapid ablation zone expansion amplifies north Greenland mass loss», 2019.
- 34** Saros, J., u. a.: «Arctic climate shifts drive rapid ecosystem responses across the West Greenland landscape», *Environmental Research Letters* 14 (7), 074027, 2019.
- 35** Ebd.
- 36** Witze, A.: «Dramatic sea-ice melt caps tough Arctic summer», *Nature* 573 (7744), 2019, S. 320–321.
- 37** Shankman, S.: «Greenland's melting: Heat waves are changing the landscape before their eyes», InsideClimateNews, 2019. <https://insideclimate-news.org/news/01082019/greenland-climate-change-ice-sheet-melt-heat-wave-sea-level-rise-fish-global-warming>
- 38** Witze, A.: «Dramatic sea-ice melt caps tough Arctic summer», *Nature* 573, 2019, S. 320–321.