

Vom Wirken der Wälder

Weißt du nicht, dass die Wälder das Leben eines Landes sind?

Babylonische Keilschrift

Es ist wohl unbestritten, dass ein Klimawandel nicht nur mit singulären Veränderungen in Erscheinung tritt, sondern die Erde und ihre Ökosysteme in komplexer Weise verändert. Gegenwärtig stehen die folgenden terrestrischen Aspekte im Zentrum der Aufmerksamkeit: (i) Anstieg der Konzentrationen von Kohlendioxid, CO₂, und anderen „Klimagasen“ in der Atmosphäre auf Grund der vom Menschen bewirkten „offenen“ Kreisläufe, vgl. ¹; (ii) damit verbundene Änderungen von Temperatur und (iii) Niederschlägen sowie (iv) Verlängerung von Vegetationsperioden; (v) Änderung der Artenzusammensetzung und (vi) Zunahme von Extremereignissen in Wetter und Klima. ² Auch Einflüsse der Lithosphäre mit Vulkanen und Rohstoffförderung seien zu berücksichtigen. Nicht vernachlässigbar sei auch der Beitrag einer veränderten, ungestüm wachsenden Landnutzung ³ infolge einer Bevölkerungsexplosion. ⁴ So wurde 2010 der Anteil der Land- und Forstwirtschaft am *anthropogenen Treibhauseffekt* zu ca. 24 % berechnet, während der des Verkehrs im Vergleich bei nur 14 % lag. ⁵

Diese Veränderungen werden durch den Energiehaushalt der Erde, d.h. die Wechselwirkungen zwischen Sonnenstrahlung und Erdoberfläche – Festland, d.h. Böden, Moore und Wälder, sowie Ozeane – bedingt und beschrieben. Dazu gehören die Absorption der Wärmestrahlung durch die Atmosphäre, die globalen Windsysteme und Meeresströmungen, die die Wärme über die Erde verteilen, sowie auch Auswirkungen von Schnee und Eis, die das Sonnenlicht stark reflektieren, und der Pflanzendecke, die Treibhausgase bindet und den Wasserkreislauf reguliert. In den letzten Jahrzehnten tritt als eine weitere wesentliche, verstärkend wirkende Komponente die *anthropogene Emission* von sogenannten Klima- oder Treibhausgasen, insbesondere von H₂O, CO₂, CH₄, SF₆, N₂O, O₃, Halogenkohlenwasserstoffen, auf. ^{6, 7} In der stofflichen Zusammensetzung der Erdatmosphäre aber machen die Treibhausgase nur einen sehr geringen Teil aus. Dennoch seien sie störend für das Gleichgewicht zwischen der Einstrahlung und der Abstrahlung von Energie, d.h. sie beeinträchtigen den *natürlichen Treibhauseffekt*, s. Bild 1. Die Lehrmeinung lautet, dass letzterem ein *anthropogener Treibhauseffekt* überlagert werde. Infolgedessen strebe der Energiehaushalt der Erde einem neuen Gleichgewicht zu. Die solare Energieflussdichte – ausgehend von der Sonne - beträgt im globalen Mittel am oberen Rand der Atmosphäre ca. 341 W/m² (W = Watt). Die Erde empfängt davon an ihrer Oberfläche global über ein Jahr gemittelt ca. 240 W/m² Strahlungsenergie. Es werden also ca. 101 W/m² an Wolken, Aerosolen und atmosphärischen Gasen reflektiert. Da im Gleichgewicht Einstrahlung gleich Abstrahlung gilt, strahle andererseits die Erde im Gleichgewicht global über das Jahr

¹ Helmut Ullmann, Reifeprüfung, Books on Demand, Norderstedt, 2008, S. 76

² http://waldundklima.net/klima/wald_klima_01t4.php;

³ <https://www.dkrz.de/about/media/galerie/Vis/land/ackerland>

⁴ <https://www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/012040/index.php>

⁵ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, Figure 1.7.

⁶ <http://www.oekosystem-erde.de/html/klima.html>

⁷ https://www.fona.de/mediathek/pdf/Perspektive_Erde_2013_09_low.pdf

gemittelt etwa 240 W/m^2 ins Weltall ab. Gemäß dem Gesetz von *J. Stefan* und *L. Boltzmann*⁸ ergeben 240 W/m^2 eine effektive Abstrahlungstemperatur von *ca.* -18°C ⁹. Das entspricht global über das Jahr betrachtet der Lufttemperatur in *ca.* 5 km Höhe. Diese Höhe wird *mittlere* oder *effektive Abstrahlungshöhe* genannt. Am Erdboden hingegen misst man global über das Jahr gemittelt eine Wärmeabstrahlung von *ca.* 398 W/m^2 . Nach dem *Stefan-Boltzmann*-Gesetz und auf Grund von Temperaturmessungen entspricht dies hier einer Temperatur von *ca.* 15°C . Die Differenz von *ca.* 33°C nennt man den *natürlichen Treibhauseffekt*, vgl.¹⁰. Mit einer Zunahme der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre steige die Abstrahlungshöhe zum Weltall hin an. Doch in höheren Bereichen der Atmosphäre herrscht eine niedrigere Temperatur, und daher strahle die Erde (Atmosphäre) nun weniger Wärme ab, und zwar solange, bis sich ein neues Gleichgewicht mit der eingestrahnten Sonnenenergie ergäbe.¹¹

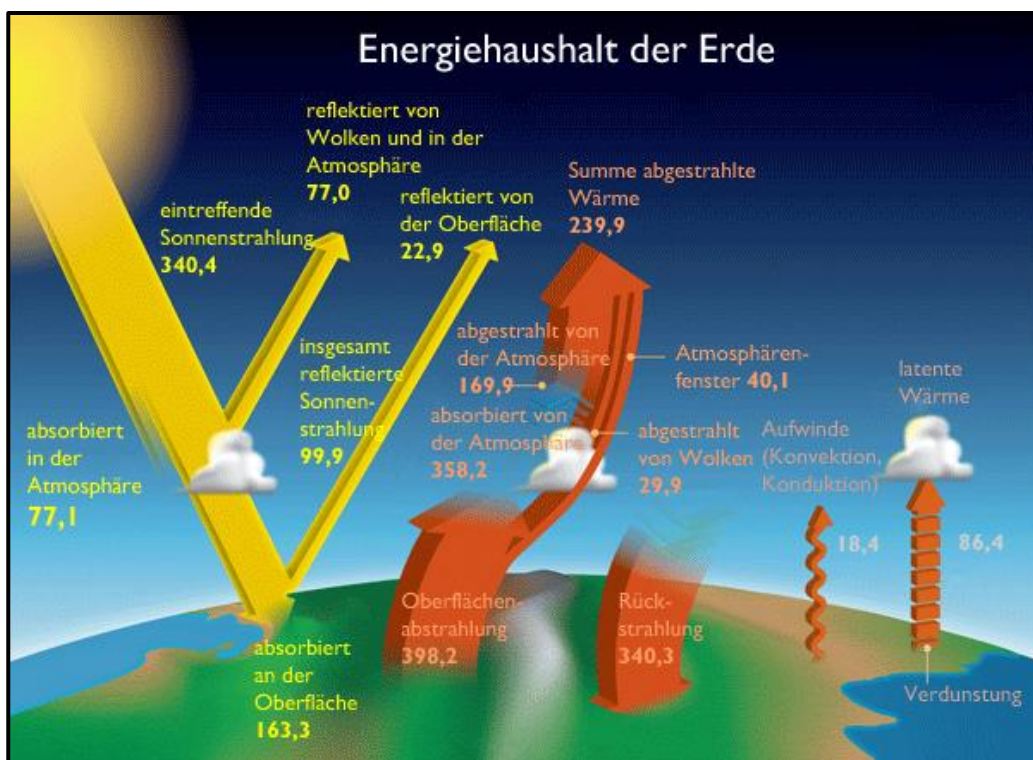


Bild 1. Energiehaushalt der Erde im Gleichgewichtszustand: Sonnenstrahlung (gelb) erwärmt die Erdatmosphäre und die Erdoberfläche, sie wird als Wärmestrahlung (rot) wieder abgegeben. Zahlenangaben: 10-Jahres-Durchschnittswerte in W/m^2 . Ein Teil der Wärmestrahlung wird von Gasen in der Atmosphäre zur Erde rückgestrahlt – die Atmosphäre wirkt daher als ein „natürliches Treibhaus“. Quelle: NASA (public domain).

⁸ Das *Stefan-Boltzmann*-Gesetz gibt an, welche Strahlungsleistung P ein Schwarzer Körper der Fläche A und der absoluten Temperatur T aussendet. Es lautet $P = \sigma A T^4$. Die Konstante σ beträgt $\approx 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

⁹ Das „*ca.*“ der Temperaturangaben folgt vorwiegend aus der (sphärischen) *Albedo* der Erde, α , die ein Maß für die Helligkeit eines Körpers ist. Sie beträgt für die Erde *ca.* 0,3. Folglich gilt $P = (1 - \alpha) \sigma A T^4$.

¹⁰ <https://bildungsserver.hamburg.de/atmosphaere-und-treibhauseffekt/2069648/treibhauseffekt-natuerlich-artikel/>

¹¹ Diese für die Postulierung des *anthropogenen Treibhauseffekts* essentielle Aussage ist jedoch schwer verständlich. Warum sollte eine solche Verschiebung auftreten, und welches quantitative Ausmaß sollte sie haben hinsichtlich der Konzentrationsänderungen der Treibhausgase, speziell aber des CO_2 , um den Effekt, das Gleichgewicht zwischen Energieeinstrahlung und -abstrahlung wiederherzustellen, hervorrufen zu können? Zudem sollte sich CO_2 – wegen seines deutlich höheren Molekulargewichts im Vergleich mit jenen von Stickstoff und Sauerstoff in der Atmosphäre – eher in oberflächennahen als oberflächenfernen Regionen anreichern.

Die Temperatur der unteren Atmosphäre nehme daher solange zu, bis das neue Gleichgewicht erreicht sei.¹² Eine Verdopplung der CO₂-Konzentration führe zu *ca.* 1 °C zusätzlicher Erwärmung an der Erdoberfläche. Diese Erscheinung wird als *anthropogener Treibhauseffekt* bezeichnet.¹³

In diesem Aufsatz soll vorzugsweise auf Wechselwirkungen zwischen Wäldern und Klima sowie ihres Wandels eingegangen werden, s. Bild 2. Die Wälder der Erde und das Klima stehen miteinander in einer komplexen Beziehung.^{14, 15} Sie sollten daher in der Debatte um den Klimawandel eine besondere Stellung einnehmen. Zum einen stellen Wälder die wichtigste terrestrische Kohlenstoffsенke dar.¹⁶ Über den Prozess der Photosynthese¹⁷ binden sie CO₂ aus der Luft, bilden Glucose für ihr weiteres Wachstum und geben Sauerstoff an die Atmosphäre ab, wodurch das Klima für den Menschen positiv beeinflusst wird – jedoch existiert hierfür eine Grenze. Nach einem gewissen Grad des Wachstums und der Ausbreitung der Vegetation könnte nämlich so viel CO₂ aus der Atmosphäre gebunden werden, dass der *natürliche Treibhauseffekt* gestört wird, und es zu einer Erwärmung der Erde mit jenen negativen Szenarien kommt, die dem *anthropogenen Treibhauseffekt* zugeschrieben werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, dass die Wälder infolge eines Klimawandels zur Quelle von CO₂ werden, wodurch die Erderwärmung beschleunigt werden würde. Derartige Prozesse liefen im Laufe der Erdgeschichte nicht nur einmal ab.¹⁸

Der Einfluss von Wäldern, Savannen und Wüsten auf das Klima ist mithin bemerkenswert groß. Doch mangels genauer und umfassender Daten lässt er sich trotz vielfältiger Bemühungen bisher nur schwer in die Simulationsprogramme der Klimatologen einbauen. So gab es in der erdgeschichtlichen Phase des Miozän, d.h. vor etwa zwei Dutzend Millionen Jahren, *ca.* 25 % mehr Wälder als heute auf der Erde existieren. Diese Vegetation erhöhte die Durchschnittstemperatur der Atmosphäre um 0,9 °C, wie aus Proxy-Daten abgeleitet worden ist. Das bedeutet, ein Viertel mehr Wälder auf der Erde ließ die Temperatur stärker steigen als der dem Menschen zugeschriebene Einfluss, d.h. des *anthropogenen Treibhauseffekts*, der in den letzten hundert Jahren einen Anstieg von ~ 0,8 °C zu Stande gebracht hat.¹⁶

Als ein Beispiel für Prozesse in anderer Richtung diene das folgende. Vor hunderten Millionen Jahren, im Paläozoikum bis Mesozoikum, als die ersten Wälder die Landflächen der Erde bedeckten, banden die Gewächse sehr viel CO₂ aus der Luft. Große Teile dieser Wälder wurden später unter Erdmassen begraben und verwandelten sich im Laufe der Jahrtausende in Kohle. Damit aber fehlte in der Erdatmosphäre das in ihr gebundene CO₂ als Treibhausgas (*natürlicher Treibhauseffekt*). Das Klima wurde durch Abkühlung bestimmt. Auswirkungen dieser Veränderung der Vegetation führten zu einer gewaltigen Vereisung des Planeten. Modellrechnungen mit Hilfe des *Planet Simulator*-Systems zeigten jedoch, dass die Erde nicht vollständig vereiste.

¹² Eine kritische Diskussion dieser Aussagen befindet sich in folgendem *Blog*:
<http://www.science-skeptical.de/blog/der-treibhauseffekt-in-einer-abbildung/0016410/>

¹³ <http://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38441/anthropogener-treibhauseffekt>

¹⁴ <http://klimatetochskogen.nu/de/>

¹⁵ https://www.naturefund.de/wissen/natur_und_klima/waelder/

¹⁶ <https://www.yumpu.com/de/document/read/38575060/co-senken-und-quellen-in-der-waldwirtschaft>

¹⁷ Die chemische Summenformel der Photosynthese lautet:

$6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 + \text{Sonnenenergie als Licht} = 6 \text{ O}_2 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$

Wasser + Kohlenstoffdioxid + Sonnenenergie als Licht = Sauerstoff + Glucose (Traubenzucker)

Die Photosynthese läuft in den Chloroplasten der Blätter ab.

¹⁸ <https://www.mz-web.de/panorama/umwelt-waelder-machen-klima-8034084>

Überraschend war ein weiteres Ergebnis der Simulationen. In einigen der betrachteten Szenarien setzte die Vereisung unabhängig von der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ein. Sowohl für den vorindustriellen CO₂-Wert, 280 ppm, als auch für eine hohe Konzentration, 510 ppm, ergaben die Simulationen stets eine weitgehend gleichermaßen vereiste Erde.¹⁹ Dazu heißt es in¹⁸: "... an escape from an extreme glaciation should require a strongly enhanced CO₂ concentration, which finally should have resulted in a super-greenhouse environment."

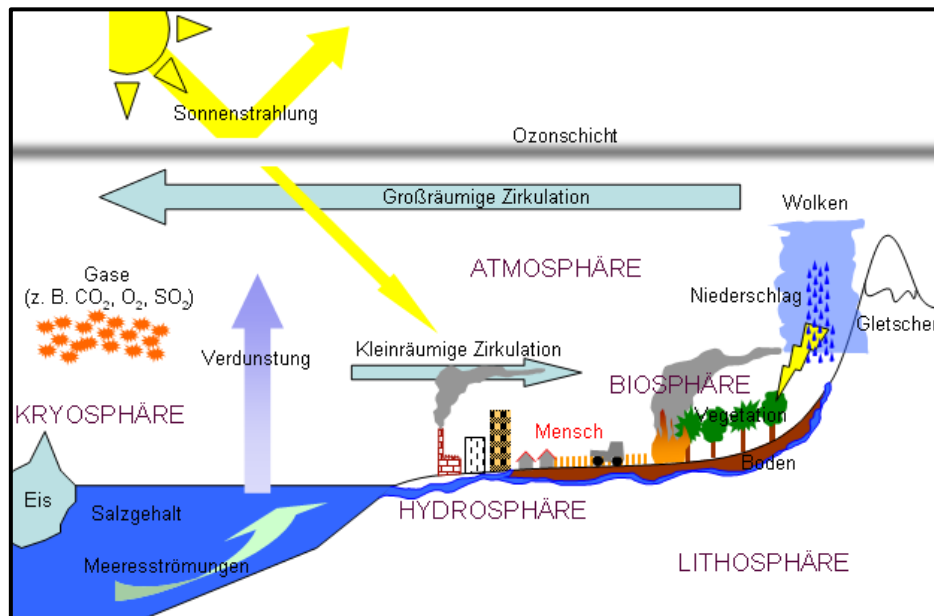


Bild 2. Das Klimasystem der Erde mit seinen Teilsystemen.²⁰

Dabei ist der Einfluss verschiedener Regionen der Erde auf das Klima unterschiedlich. Dunkle Wälder absorbieren die Sonnenstrahlung wesentlich stärker als die Böden der Tundra oder gar die gleißenden Schnee- und Eisflächen der polaren Landschaften, weshalb sie das Klima besonders stark beeinflussen. Vor einem Dutzend Millionen Jahren, zwischen Pliozän und Miozän, wuchsen im hohen Norden der Erde dichte Wälder. Sie nahmen die Sonnenenergie so gut auf, dass sich die Temperatur in diesen Regionen drastisch um mehrere °C erhöhte.²¹ Ein anderes Bild zeigte die Sahara. Sie war vor 7-11 Millionen Jahren, im frühen Pliozän, keine Wüste, sondern stellte eine Savannenlandschaft dar, die dem heutigen Ostafrika ähnelte. Eine Wüste aber reflektiert erheblich mehr Sonnenlicht als eine Savanne und ist daher auch kühler. Für die Nordhälfte der Erde zieht dieser Unterschied eine Reihe weiterer Änderungen nach sich. So steigt in Äquatornähe zufolge der Tropenhitze ständig heiße Luft in die Höhe, wandert nach Norden, kühlt ab, sinkt in die Tiefe und strömt am Boden zum Äquator zurück. Kühlt die Sahara ab, so wird sie von dieser gigantischen Luftumwälzpumpe weiter nach Süden gedrängt. Dadurch aber wird es südlich der Sahara wärmer. Gleichzeitig aber schaufeln die Luftströme weniger Wärme in die höheren Breiten des Nordens. Die Sahara übt somit einen globalen Einfluss auf das Klima aus. Computer-Simulationen sagen für hohe Breiten erheblich stärker

¹⁹ Arne Micheels and Michael Montenari, A snowball Earth versus a slushball Earth: Results from Neoproterozoic climate modeling sensitivity experiments, *Geosphere* **4**, N2, 401-410, 2008

²⁰ <http://klima-der-erde.de/klima.html>

²¹ Rainer Schneck, Arne Micheels and Volker Mosbrugger, Climate impact of high northern vegetation: Late Miocene and present, *Intern. J. Earth Sciences*, **101**, N1, 323-338, 2012

steigende Temperaturen voraus als für den Rest der Welt.²² Während es gegenwärtig in der kahlen Tundra des sibirischen Nordens noch zu kalt dafür ist, könnten in einer wärmeren Zukunft auch dort Wälder wachsen.²³ Diese vergleichsweise dunkle Vegetation würde aber mehr Sonnenlicht absorbieren und somit das Klima zusätzlich aufheizen. Für Sibirien vorherzusehende Prozesse schließen des Weiteren infolge des Auftauens der Permafrost-Gebiete das Freisetzen gewaltiger Mengen des Treibhausgases CH₄ ein, die – in die Atmosphäre entlassen – den Treibhauseffekt über alle Maßen und nachhaltig verstärken würden.

Es gibt eine Reihe weiterer Einflüsse der Vegetation auf das Klima. So geben Bäume des Regenwaldes, z.B. im Amazonas-Gebiet, Amazonien, etwa die Hälfte des auf sie niedergehenden Regens als Feuchtigkeit wieder an die Atmosphäre ab. Mehr Feuchtigkeit aber bedeutet mehr Wolken und damit auch mehr Niederschläge. Somit erzeugen die Wälder in Amazonien selbst einen Teil des Regens. Doch der Einfluss der Vegetation auf das Klima wirkt nicht als Einbahnstraße. Er kann sich umkehren. Denn nimmt der Regen ab, so fehlt den Wäldern Wasser, und über einen längeren Zeitraum treten in tropischen Regionen allmählich Savannen an die Stelle von Wäldern. Ihre Graslandschaften geben bedeutend weniger Wasser ab, und die Luftfeuchtigkeit sinkt weiter, d.h. die Niederschläge nehmen noch stärker ab.

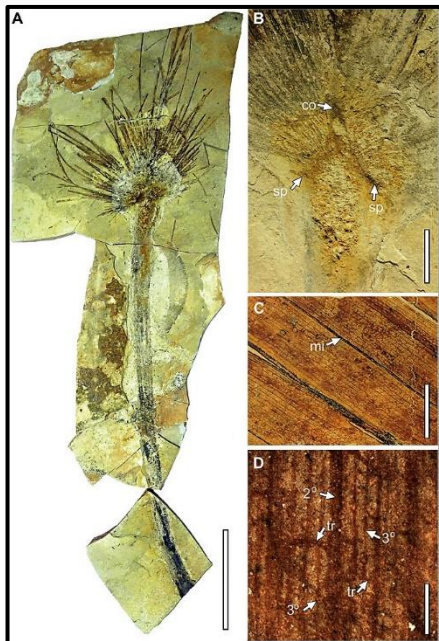


Bild 3. Fossiler Palmwedel aus dem Hochland des Tibet. (Quelle: ²⁴)

Ein neuer Fund deutet – neben vielen älteren – auf weitere bedeutende Wechselwirkungen zwischen Klima und Vegetation in der Erdgeschichte hin. Am Boden eines ausgetrockneten Sees, damals auf einer Höhe von ca. 2,3 km, jetzt im Hochland des Tibet, wurden fossile Palmwedel, s. Bild 3, gefunden, deren Alter 25,5 Millionen Jahre beträgt²⁴ – aus dem Oligozän stammend. Vergleiche der neu identifizierten Art *Sabalites tibetensis* mit heute existierenden Palmen zeigen, dass damals der kälteste Monat eine mittlere Temperatur von $\geq 5\text{ °C}$ gehabt haben könnte – bei einem Jahresmittelwert von $> 14\text{ °C}$.

Von der prinzipiell möglichen Wirkung von Prozessen einer Umkehrung des Klimawandels durch Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre, die die anthropogene Emission von Treibhausgasen prävalierte, ist die Menschheit gegenwärtig weit entfernt, und sie entfernt sich von solchen mit wachsender Geschwindigkeit weiter. Unter diesem Aspekt mutet das Konzept der „negativen Emissionen“²⁵, vertreten von der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, geradezu hilflos an. In diesem Zusammen-

²² <https://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/erdklima-die-erde-ist-wohl-nie-ein-schneeball-gewesen-1544496.html>

²³ <http://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13496606.html>: Interview mit *Michail I. Budyko*, 1920-2001, einem russischen Klimatologen und Geophysiker. *MIB* galt als einer der führenden europäischen Klimaforscher. In dem zitierten Spiegel-Interview von 1990 äußerte er u.a.: „Es wird zu einem Klima kommen, wie es viele Millionen Jahre auf der Erde geherrscht hat. In diesen Jahrmlionen war die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre fünfmal, zeitweise sogar zehnmal höher als heute, dabei gab es eine reiche Vegetation und Tierwelt – die klimatischen Zustände von damals können also nicht als gefährlich betrachtet werden.“

²⁴ *T. Su, A. Farnsworth, R. A. Spicer, et al., No high Tibetan Plateau until the Neogene, Science Advances, March 06, 2019; 5, N 3, eaav2189, doi: 10.1126/sciadv.aav2189*

²⁵ *acatech/Leopoldina/Akademienunion, Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik, 2019*

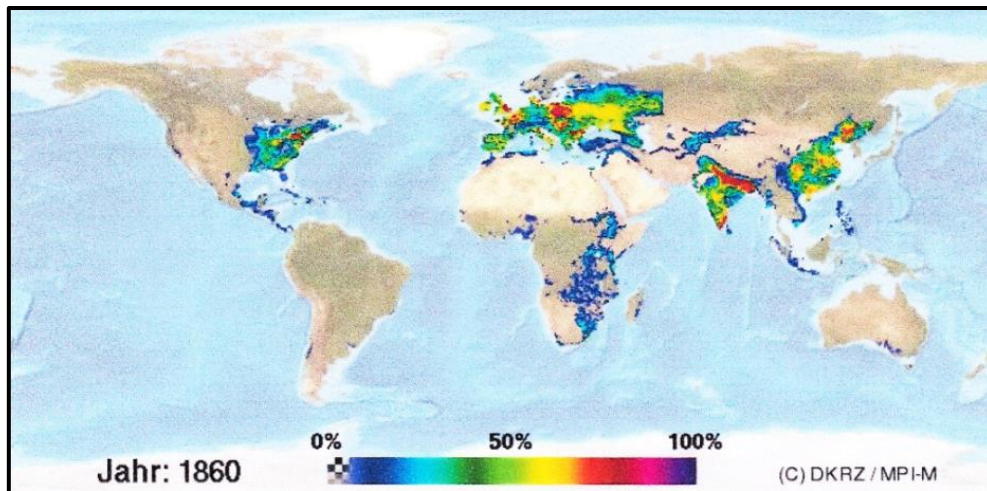


Bild 4a. Ausdehnung der landwirtschaftlich genutzten Flächen im Jahr 1859.³

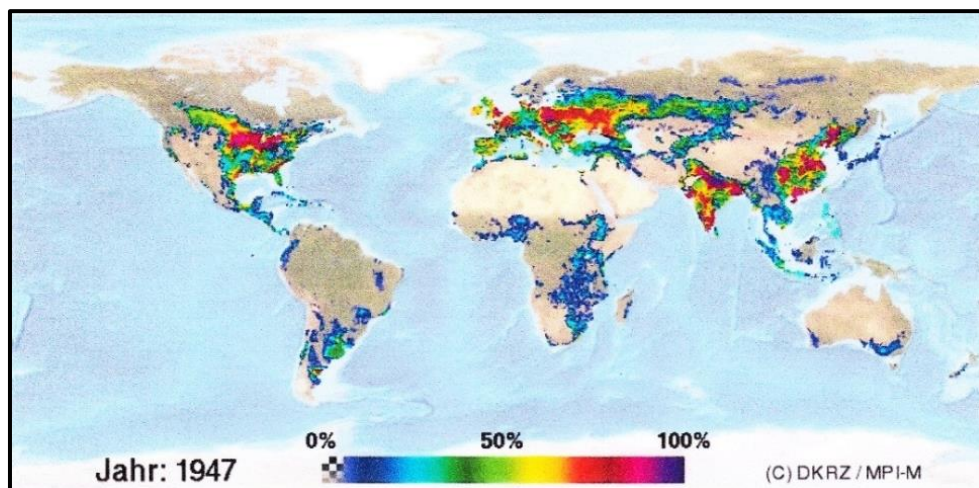


Bild 4b. Ausdehnung der landwirtschaftlich genutzten Flächen im Jahr 1995.³

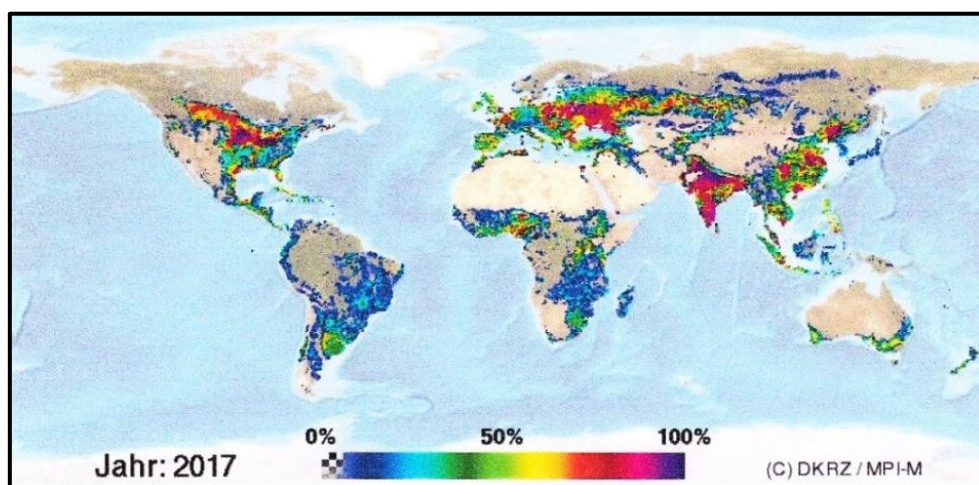


Bild 4c. Ausdehnung der landwirtschaftlich genutzten Flächen im Jahr 2017.³

hang ist die in den Bildern 4a-c dargestellte Ausdehnung von landwirtschaftlichen Nutzflächen über die letzten 150 Jahre ²⁶ sehr beredt. Sie zeigen die ausschnittsweise Ausbreitung von Ackerland über die Erdoberfläche für die Zeit von 1860 bis 2017. Zugrunde gelegt ist jeweils der Anteil einer Gitterzelle, der mit Äckern bedeckt ist. ²⁶ Ackerland wurde und wird überwiegend durch Rodung von Wäldern oder Kultivierung von Savannen gewonnen. Diesem Prozess sollte global mit Wiederaufforstung entgegengewirkt werden - eine Binsenweisheit, die durch detaillierte Computer-Simulationen gestützt wird. ²⁷ Doch solche Maßnahmen, wie wichtig sie auch seien, werden in höchstem Maße durch anthropogene Gegenprozesse überlagert: So werden – wie extrapolativ ermittelt - über zwei Jahrzehnte hin *ca.* 55 % der heutigen Regenwälder vernichtet sein. Bis zum Jahr 2030 sollen durch ihre Zerstörung voraussichtlich (56-97) Milliarden Tonnen an zusätzlichem CO₂ freigesetzt werden. Täglich verschwinden aufgrund der exponentiell wachsenden Bevölkerungszahl und Profitgier menschlicher Spezies und ihrer Organisationen riesige Flächen, um Ackerland zu gewinnen und / oder wertvolle Hölzer zu verkaufen.

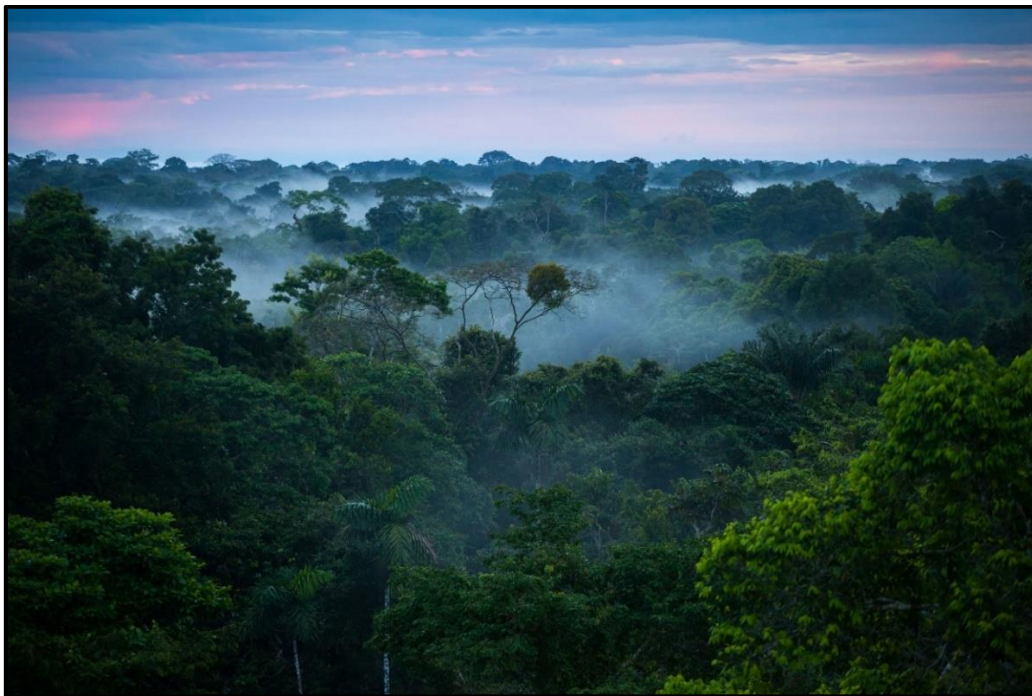


Bild 5. Tropischer Regenwald in Französisch-Guyana. ²⁸ Das Land ist zu 98 % mit Wäldern bedeckt.

Tropische Regenwälder erstrecken sich über weite Regionen, es sind *ca.* 13,4 Millionen km², in Süd- und Mittelamerika, Südostasien, Afrika und Australien, s. Bild 6. Es gibt sie seit *ca.* 60 Millionen Jahren. Sie wachsen in immer feuchten Klimazonen der Tropen mit 9 bis 12 nassen Monaten im Jahr. Allein in Französisch-Guyana erstreckt sich tropischer Regenwald über ein Gebiet von etwa 6 Millionen km². Der Amazonas-Regenwald, das Königreich riesiger, Jahrhunderte alter, wertvoller Bäume, ist auch die Heimat von *ca.* 5 000 Pflanzenarten und blühenden Epiphyten wie Orchideen und Araceen. Darunter wachsen zahlreiche andere große und

²⁶ Die Daten wurden am Max-Planck-Institut für Meteorologie rekonstruiert, wobei Informationen zu landwirtschaftlichen Flächen der letzten drei Jahrhunderte mit Bevölkerungsdaten des letzten Jahrtausends kombiniert wurden. J. Pongratz, C. Reick, T. Raddatz and M. Claussen, A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium, in *Global Biogeochemical Cycles*, **22**, N3, 2008.

²⁷ https://www.mpg.de/10888127/mpi_f-_meteorologie_jb_20162

²⁸ <https://www.easyvoyage.de/franzoesisch-guyana/amazonas-regenwald-1427>

kleine Arten in verschiedenen Etagen: Palmen, Ameisenbäume, Lianen, Epiphyten auf Bäumen, Farne u.v.m. Stürzt ein gigantischer Baum um, bildet sich eine Lichtung auf kleiner Fläche, auf die Licht einfällt, wodurch sich schnell eine völlig neue Vegetation ausbreitet.

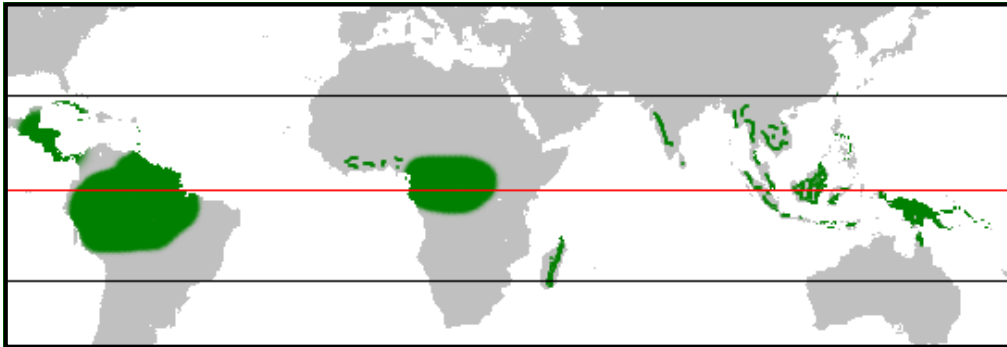


Bild 6. Gebiete tropischer Regenwälder. (Äquator, rot, zwischen Wendekreisen von Krebs bzw. Steinbock) ²⁹

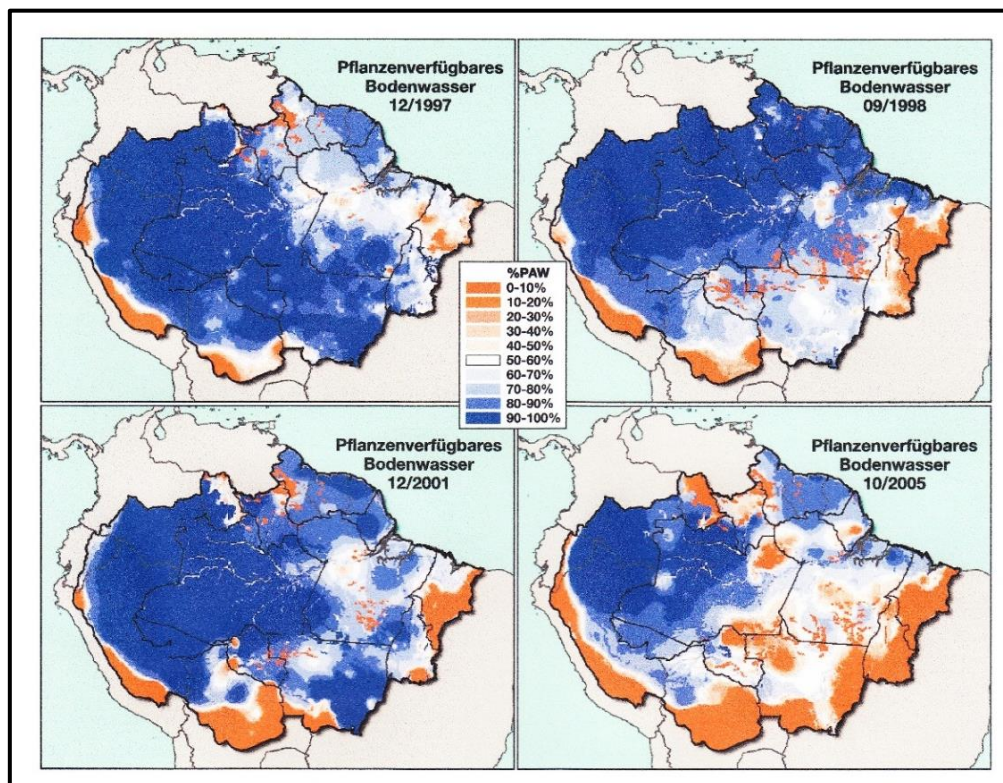


Bild 7. Bodenfeuchtigkeit im Amazonas-Gebiet für vier schwerer Dürren; Schätzungen des maximalen Anteils an pflanzenverfügbarem Bodenwasser bis zu 10 m Tiefe, basierend auf der monatlichen Niederschlagsmenge und Evapotranspiration, aktualisiert nach ³⁰. Die dürrebedingte Baumsterblichkeit beginnt, wenn das pflanzenverfügbare Bodenwasser auf 30 % seines Maximums fällt (braune Flächen). ³¹

Die tropischen Regenwälder sind zudem der Lebensraum nicht nur vieler unikatler Tierarten, die nunmehr vom Aussterben bedroht sind, sondern auch zahlreicher indigener Völker, deren Namen weitestgehend unbekannt sind. ³⁰ Sie nutzen viele hier heimische Pflanzenarten für vielfältige Zwecke bis hin zu Nahrung und Medikation.

²⁹ <http://www.faszination-regenwald.de/info-center/allgemein/geografie.htm>

³⁰ <https://www.helles-koepfchen.de/tropischer-regenwald.html>

Doch Zustand und Zukunft der tropischen Regenwälder sind alarmierend. Darüber heißt es in ^{31, 32} wie folgt: “Der Amazonas steht an der Schwelle zu dramatischen Veränderungen, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind. Wenn es der Gesellschaft nicht gelingt, die Treibhausgas-Emissionen erheblich zu reduzieren, um einen gefährlichen Klimawandel zu verhindern, wird die globale Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts die Niederschlagsmenge im Osten Amazoniens wahrscheinlich um über 20 % verringern, und die Temperatur wird sich um über 2 °C, vielleicht sogar um bis zu 8 °C, erhöhen. Die daraus resultierende Trockenheit wird im östlichen Amazonas-Becken besonders streng sein. Die Ausbreitung von Trockenheit und Hitze könnte noch verstärkt werden durch das großflächige Waldsterben und die Ausbreitung von savannenähnlichen und semiariden Vegetationsformen.“ ³³ Die Verheerung der Regenwald-Gebiete könnte dazu führen, dass mehr als die Hälfte aller Wälder mit geschlossenem Blätterdach in Amazonien in den nächsten 15–25 Jahren umgewandelt, beschädigt oder beseitigt wird. ³⁴ Auch würde dadurch die Photosynthese sehr beeinträchtigt werden, s. Bilder 8 - 9. Folgen dieser Gefahr wären nicht nur für die Wälder gewaltig. Es würde jüngste Erfolge beim

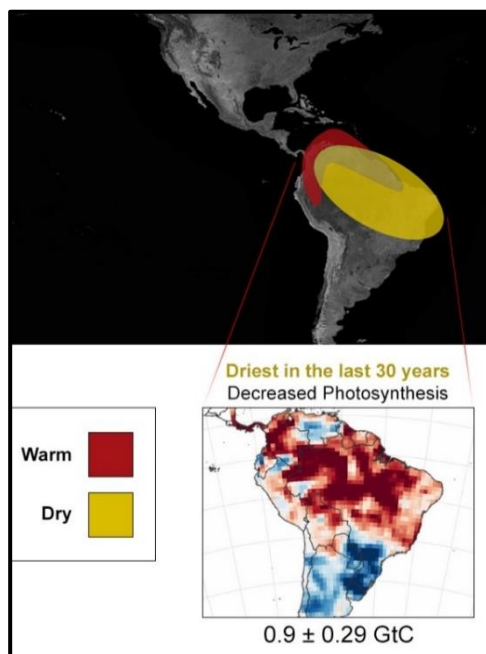


Bild 8. Die mit Regenwäldern bedeckten Landmassen Südamerikas bergen ca. $0,9 \pm 0,3$ Gigatonnen Kohlenstoff. ³⁵

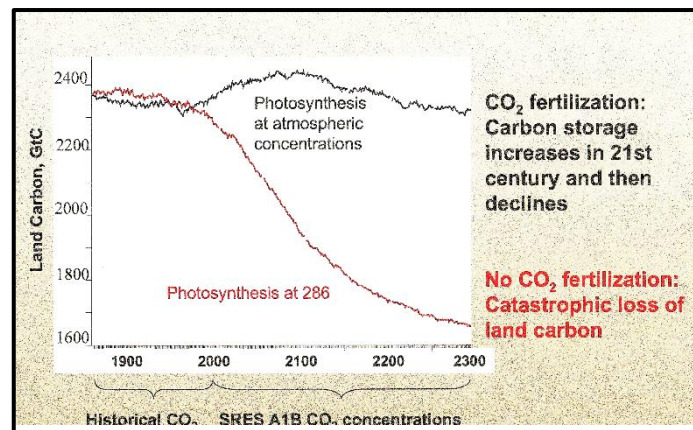


Bild 9. Zeitabhängigkeit der Kohlenstoff-Reserve des Bodens von der Verfügbarkeit von CO₂ in der Atmosphäre. ³⁶

Reduzieren globaler Treibhausgas-Emissionen zu-nichtemachen. Diesen Prozessen stehen allmähliche Verhaltensänderungen von Staatsführern und Landbesitzern entgegen. Sie betreffen das Einrichten großer Schutzgebiete im Bereich der vorrückenden Agrarfront, wichtige Marktentwicklungen zugunsten eines verantwortungsvollen Forstmanagements und eines möglichen internationalen Mechanismus, um tropische Länder für den Schutz ihrer Wälder finanzwirtschaftlich und organisatorisch sowie in ihrem Bemühen, die Armut der Bevölkerung zu verringern, die ebenfalls die Wälder zerstört, zu unterstützen.

³¹ Nepstad, D. C., P. A. Lefebvre, U. L. Silva Jr, et al., Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis, *Global Change Biology*, **10**, (2004), 704-717

³² Daniel C. Nepstad, Der Teufelskreis am Amazonas.- Dürre und Feuer im Treibhaus, WWF International, 2007, Gland/Schweiz, 20 pages.

³³ Man beachte, dass das Alter der zugrunde liegenden Untersuchungen etwa 1 ½ Jahrzehnte beträgt.

³⁴ <http://www.faszination-regenwald.de/info-center/allgemein/geografie.htm>

³⁵ NASA, Klimakarte 2017

³⁶ L.T. Sentman and E. Shevliakova, Land Ecosystems and Biogeochemical Cycling, *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Review*, June 30 - July 2, 2009

Diese Entwicklungen ³⁷ können die Wahrscheinlichkeit eines großflächigen Absterbens speziell des Amazonas-Regenwaldes verringern. Ausgehend von der vom Weltklimarat vertretenen Hypothese des *anthropogenen Treibhauseffekts* könnte das langfristig vielleicht nur verhindert werden, wenn die weltweiten Treibhausgas-Emissionen so stark reduziert werden, dass die globalen Temperaturen um nicht mehr als ein bis zwei °C ansteigen.

Die Bilder 10 - 11 zeigen typische Eigenschaften des Klimas in tropischen Regenwäldern, *viz.*, die jahreszeitlichen Verläufe von Temperatur und Niederschlag, im Vergleich zwischen jenen für tropische und gemäßigte Klimazonen am Beispiel der Städte Cayenne und Berlin. ³⁸

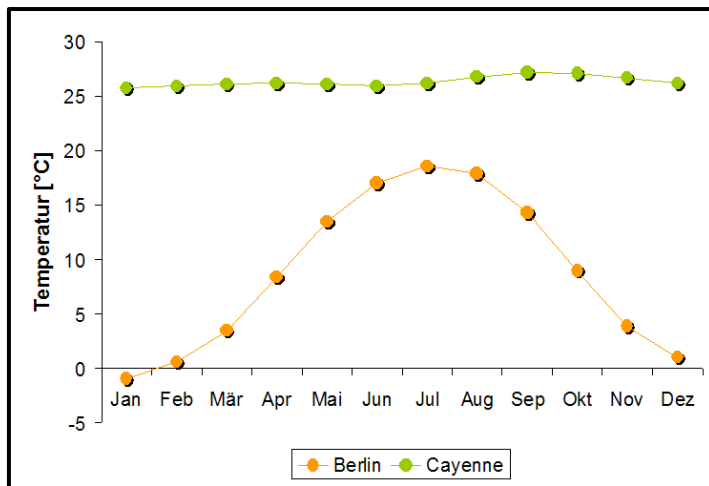


Bild 10. Durchschnittliche monatliche Temperaturen der Tropenstadt Cayenne (Französisch-Guayana; grün; oben) und Berlin (rot; unten). Cayenne liegt 4,8 Grad nördlich des Äquators, Berlin 52,5 Grad nördlich. Über das ganze Jahr gemittelt, liegt die Durchschnittstemperatur in Cayenne bei 26,4 °C und in Berlin bei 8,9 °C. ³⁹

Das Wetter im tropischen Regenwald bleibt Tag für Tag eines Jahres nahezu gleich. Etwa 25-56 % seines Regens erzeugt der Regenwald selbst, indem er vorherige Niederschläge in den Kreislauf schickt. ⁴⁰

Es sind nicht allein die Regenwälder Amazoniens, die unbarmherzig gefällt und gerodet werden. Afrika betrifft es gleichermaßen. Ehemals erstreckte sich der afrikanische Regenwald von der Westküste Senegals bis in den Osten Ugandas. Jedoch von 1990 bis 2017 sind 12 % der Waldfläche Afrikas, d.h. *ca.* 860 000 km², was der Fläche von Tansania entspricht, verloren gegangen. Allein in Nigeria wurden in dieser Zeit *ca.* 60 % aller Wälder vernichtet. Hauptgründe sind eine aufstrebende industrielle Landwirtschaft, die Viehhaltung und der Anbau von Soja und Palmöl in Landschaften riesiger Monokulturen. In Simbabwe geht diese Entwicklung auf die Ausweitung des Tabakanbaus zurück, der *ca.* 90 000 Menschen beschäftigt. Auch werden dort jährlich Millionen Tonnen Feuerholz geschlagen. Der wirtschaftliche, ökologische und

³⁷ Dies betrifft natürlich nicht nur die Wälder in tropischen, sondern auch in gemäßigten und kaltgemäßigten Zonen, vgl. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s02061_greenpeace_studie_waldvision.pdf (Greenpeace WALDVISION, Wenn die Wälder wieder wachsen, 2018);

<http://www.sonnenseite.com/de/umwelt/waelder-bergen-ungenutztes-potenzial-fuer-den-klima-und-naturschutz.html>;

<https://anca24deutsch.wordpress.com/2015/02/13/das-klima-von-borealen-wald-oder-taiga/>

<http://bildungsserver.hamburg.de/contentblob/3113382/ff511dda391b2e9db53697225bd51e5d/data/2007-oeko-system-wald.pdf> (Harriet Hoffmann, Das Ökosystem Wald als Klimafaktor, 2007)

<https://www.pro-regenwald.de/8folgen>

http://www.noegv.at/noe/Klima-_und_Waldgipfel_Zukunft_des_Waldes_durch_3-Saeulen.html

³⁸ <http://www.faszination-regenwald.de/info-center/allgemein/klima.htm>

³⁹ <http://www.worldclimate.com/>

⁴⁰ L. Aragao: <http://geography.exeter.ac.uk/research/groups/landscape/tropical/>

soziale Schaden geht in die Milliarden. Der Anteil des ohne Genehmigung geschlagenen Holzes beträgt in Kamerun *ca.* 50 %, im Kongo bis zu 70 %. ⁴¹

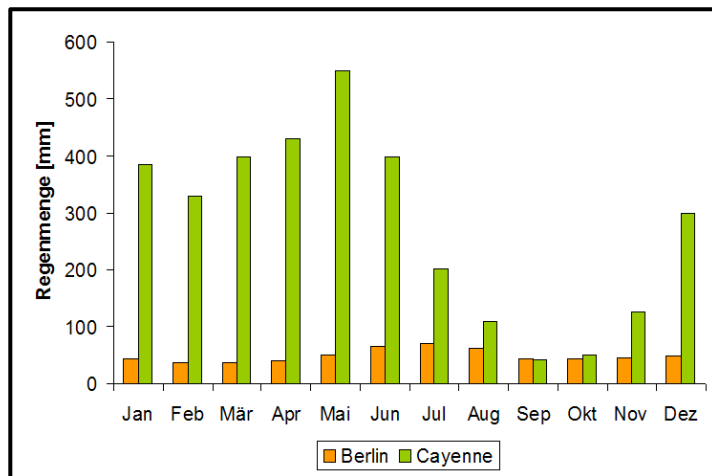


Bild 11. Durchschnittliche monatliche Regenmengen von Cayenne (Französisch-Guayana) (grün) und Berlin (rot). Pro Jahr fallen in Cayenne etwa 3 300 mm Regen, in Berlin sind es 590 mm. ³⁸ In Cayenne gibt es zwischen August und November eine „große Trockenzeit“. Gegen Februar und März gibt es nochmals eine etwas weniger trockene Periode, den „kleinen Sommer im März“. Die Regenmenge wird in l/m² oder mm Wasserhöhe angegeben. (Wird auf einer Fläche von einem m² ein l Wasser ausgeschüttet, stünde das Wasser über diesem einen m² einen mm hoch.)

Diese weltweite Abholzung aber auch die mancherorts stattfindende Aufforstung beeinflussen Klima und Wetter selbst in Gebieten, die tausende Kilometer entfernt sind. ⁴² Die tropischen Wälder speicherten Ende 2015 noch *ca.* 40 % des global vorhandenen terrestrischen Kohlenstoffs, und ihre Rodung verursachte *ca.* 7-17 % des insgesamt emittierten Kohlenstoffs. ⁴³ Deutsche Wälder speichern *ca.* 127 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr. ⁴⁴ Doch stets vollzieht sich die Zerstörung wesentlich schneller als die Regeneration. ⁴⁵ Die Notwendigkeit einer Regeneration der Wälder wird dennoch erkannt und betrieben. So hat sich Brasilien auf der Pariser Klimakonferenz 2015 verpflichtet, bis 2030 *ca.* 12 Millionen ha Landes wiederaufzuforsten. ⁴⁶ Doch die Erfüllung dieses Vorhabens und die gesamte Situation bleiben zwiespältig.

Luftmassen, die über dichten Wald ziehen, bringen doppelt so viel Niederschlag mit wie Luft, die über großflächig gerodete Gebiete streift. Dieser Effekt ist noch weit entfernt von den eigentlichen Regenwaldgebieten zu spüren. Es wird geschätzt, dass z.B. noch über Brasilia ein Drittel des Regens ursprünglich aus Amazonien stamme – obwohl die Hauptstadt > 1 500 km südlich des zentralen Amazonas-Beckens inmitten des südamerikanischen Kontinents liegt. Für Afrika südlich des Kongobeckens gilt ebenfalls diese positive Fernwirkung des Urwalds. Die Lebensgrundlage unzähliger Menschen hängt von jenen Regenfällen ab. Etwa 60 % der gesamten tropischen Landmasse profitieren von diesen Regenfällen, d.h. die tropischen Wälder sind

⁴¹ https://www.achgut.com/artikel/Gier_und_armut_zerstoeren_afrikas_waelder

⁴² <https://www.spektrum.de/news/wie-waelder-das-wetter-beeinflussen/1603100>

⁴³ C. Bello, M. Galetti, M.A. Pizo, L.F.S. Magnago, M.F. Rocha, R.A.F. Lima, C.A. Peres, O. Ovaskainen and P. Jordano, Defaunation affects carbon storage in tropical forests, *Science Advances*, **1**, No. 11, 1-10, Dec. 18, 2015

⁴⁴ <https://www.speicherwald.de/wald-und-klimaschutz/index.html>

⁴⁵ <https://www.wer-weiss-was.de/t/wald-im-klimawandel/8177577/3>

<https://www.wer-weiss-was.de/t/wald-im-klimawandel/8177577>

<https://mueef.rlp.de/de/pressemitteilungen/detail/news/detail/News/der-klimawandel-und-luftschadstoffe-schaedigen-den-wald-84-prozent-der-baeume-in-rheinland-pfalz-sin/>

http://www.biologischevielfalt.at/ms/chm_biodiv_home/chm_biodiv_home/chm_news/news_2019/wald-klima_1901022/

⁴⁶ Th. E. Lovejoy and C. Nobre, Amazon Tipping Point, *Science Advances*, **4**, N2, (Editorial) eaat234021, Feb. 21, 2018

Teil einer biologischen Pumpe, die an der globalen Zirkulation mitwirkt.⁴⁷ Keiner der Meteorologen berücksichtigte, wie Pflanzen den Regen und damit letztlich das Klima beeinflussen könnten, obwohl hierfür Hinweise in der wissenschaftlichen Literatur seit Jahrzehnten vorliegen. Doch die Flora war in einen passiven Zuschauerstatus der Meteorologie versetzt worden.⁴⁸ Inzwischen gilt:

„The world’s major forests ... can move water on almost inconceivably large scales.”^{42, 49}

Es geht praktisch um das vernachlässigte Thema des Einflusses der Erdoberfläche auf das globale Klima. Dieser Einfluss wurde z.B. durch eine falsch praktizierte Ökologisierung der US-amerikanischen Landwirtschaft auf den *Großen Prärien* in den 1930^{er} Jahren - durch den sogenannten *dust bowl*⁵⁰ - zumindest partiell in das gesellschaftliche Bewusstsein gerückt. Es handelte sich damals um eine Serie schwerer Staubstürme im Mittleren Westen der USA, die den Umfang eines nationalen Desasters annahmen. Falsche Bewirtschaftung und anhaltende Dürre machten ca. 20 Millionen Hektar Ackerland unbrauchbar. Das brachliegende Land wurde zur Quelle riesiger Staub- und Sandwolken, die weite Gebiete überdeckten und zur Abwanderung abertausender völlig verarmter Farmer und Landarbeiter führten.⁵¹ Infolge dieser Verwüstungen wurden erste zentrale Bodenschutzprogramme erarbeitet. Mit dem Begriff *dust bowl* werden inzwischen generell Trockengebiete mit häufigen Staubstürmen bezeichnet. Dessen ungeachtet wurde erst spät der entscheidende Einfluss der Pflanzenwelt auf Wetter und Klima von den Atmosphärenforschern erkannt. Sind doch Pflanzen starke Einflussfaktoren auf der Oberfläche des Planeten.⁵² Man hatte verstanden, dass die großen Wälder der Welt, die hunderte Milliarden Bäume umfassen, Wasser in fast unvorstellbar großen Dimensionen bewegen können. So ist geschätzt worden, dass der tropische Regenwald Amazoniens täglich ca. 20 Billionen l Wasser an die Atmosphäre abgibt – etwa 17 % mehr als selbst der gewaltige Amazonas-Strom führt.⁵³ Pflanzen tragen mehr als die Hälfte allen Wassers, das in Form von Niederschlägen auf die Erde trifft, bei. Auch kreieren die Wälder ihre eigenen Stürme, die sogenannten „*flying rivers*“. Agrarregionen wie der Mittlere Westen der USA, das Niltal und Indien sowie Großstädte wie Sao Paulo erhalten viel ihres Regens von diesen waldgetriebenen „fliegenden Flüssen“. Dennoch hat dies bis zu jüngster Zeit kaum gebührenden Eingang in die voraussagen-

⁴⁷ <https://www.spektrum.de/news/die-bio-regenmacher/1163922>

⁴⁸ Prof. *Abigail Swann*, https://en.wikipedia.org/wiki/Abigail_Swann

⁴⁹ *Gabriel Popkin*, *Quanta Magazine*, October 9, 2018; <https://www.quantamagazine.org/forests-emerge-as-a-major-overlooked-climate-factor-20181009/>

⁵⁰ <https://www.history.com/topics/great-depression/dust-bowl>

⁵¹ Der 1940 erschienene Roman *The Grapes of Wrath* (*Die Früchte des Zorns*) des amerikanischen Nobelpreisträgers *John Steinbeck* ist dem leidvollen Schicksal amerikanischer Farmer in jenen Zeiten gewidmet.

⁵² Die Flora pumpt Wasser vom Boden durch ihr Gewebe in die Luft, und es bewegt Kohlenstoff in die entgegengesetzte Richtung, d.h. von der Luft erst zum Gewebe und dann in den Boden. Dabei wird Sonnenenergie genutzt, Wasser gespalten, und schließlich werden Wasser, Sauerstoff und Kohlenstoff zu Zucker und Stärke verarbeitet – die Grundlage fast allen Lebens auf der Erde. Die Hauptdarsteller dieser Cnemismen sind Poren in Pflanzenblättern, sogenannte *Stomata*. Ein einzelnes Blatt kann mehr als eine Million dieser spezialisierten Strukturen enthalten. Sie sind im Wesentlichen mikroskopisch kleine Öffnungen, die gleichzeitig CO₂ aus der Luft aufnehmen und H₂O abgeben. Der Gasaustausch pro *Stoma* – und zwar eines jedem Blatts – für sich genommen ist winzig. Aber wenn Milliarden von Spaltöffnungen zusammenwirken, kann ein einzelner Baum hunderte Liter H₂O pro Tag abgeben, s. https://www.researchgate.net/publication/328463010_Gesagtes_und_Nichtgesagtes_zum_Klimawandel.

⁵³ *K. Mallick, I. Trebs, E. Boegh, A.D. Nobre, et al.*, Canopy-scale biophysical controls of transpiration and evaporation in the Amazon Basin, *Hydrology and Earth System Sciences*, **20**, 4237–4264, 2016 (zugänglich auf https://www.researchgate.net/publication/291974948_Canopy-scale_biophysical_controls_of_transpiration_and_evaporation_in_the_Amazon_Basin)

den Computer-Modelle der Klimaforscher gefunden. Erst die mathematischen Simulationen des Klimas von A.L. Swann, I.Y. Fung, et al., s. z.B. ^{54, 55} führten zu einem Durchbruch. Es wurde gezeigt, dass und wie sich das Klima in globalen Bereichen durch hypothetische Platzierungen von Wäldern verändere. Es wurden Korrelationen zwischen den Mengen gespeicherten Kohlenstoffs in Biosphäre und Hydrosphäre sowie Veränderungen von mittlerer Temperatur und Niederschlagsmengen über weite Gebiete der Erde bzw. von Variationen dieser Gebiete gefunden. ⁵⁶ Diese Effekte waren auch mit einer Neupositionierung der *Hadley-Zelle* ⁵⁷ verbunden. All das berücksichtigend, kam es zu einem Paradigmenwechsel: Es gelte nicht mehr, dass die Wälder da seien, weil es nass ist, sondern es sei nass, weil es Wälder gibt. „Könnte feuchtes Klima durch die Wälder verursacht werden?“ ⁵⁸

Die *Fung-Swann'schen* Forschungen enthüllten versteckte Fernverbindungen, nach denen eine gegebene Region in der Lage wäre, durch subtile atmosphärische Mechanismen weit entfernte Gebiete klimatisch zu beeinflussen ⁵⁹. Hier sind es Wälder und nicht Ozeane, deren Einflüsse zum Tragen kommen. Werden also genügend Bäume gepflanzt, so ließen sich die Zirkulationsmuster verändern. ⁶⁰ Doch solche Abhängigkeiten sind nicht geradlinig. Es existieren sogenannte „Kipp-Punkte“ (*tipping points*) ⁶¹, die Momente darstellen, an denen eine bislang geradlinige und eindeutige Entwicklung durch bestimmte Rückkopplungen abrupt abbricht, die Richtung wechselt oder stark beschleunigt wird. Dies können z.B. spontane, grundsätzliche Änderungen im globalen Wärmetransport durch veränderte Wasser- oder Luftströmungen sein, die dramatische Klimaänderungen in sehr kurzer Zeit bewirken. Zu Kipp-Elementen zählen das Abschmelzen des Eisschildes auf Grönland sowie in der Westantarktis oder eine Veränderung des El-Niño-Phänomens, auch werden tropische Korallenriffe beschädigt, und der Golfstrom, der das europäische Klima prägt, wird schwächer. ^{62, 63} Auch in der Rolle der Wälder mag ein und vielleicht noch entfernter Kipp-Punkt existieren: Durch das Wachstum von Wäldern

⁵⁴ Abigail L. Swann, Inez Y. Fung, Samuel Levis, Gordon B. Bonan, and Scott C. Doney, Changes in Arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect, PNAS, **107**, no. 4, 1295–1300, January 26, 2010

⁵⁵ Abigail L.S. Swann, Inez Y. Fung, and John C.H. Chiang, Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation, PNAS, **109**, no. 3, 712–716, January 17, 2012

⁵⁶ Des Weiteren stellte Swann fest, dass die simulierten Wälder viel Wasserdampf abgaben, der ein wesentlich stärkeres Treibhausgas als CO₂ ist, das die Infrarotstrahlung der Erde absorbiert und einen Teil davon wieder zurückwirft. Der Dampf lasse dadurch das Eis an Land und auf See schmelzen und enthülle dunklere Oberflächen, die wiederum mehr Sonnenlicht aufnehmen und noch wärmer wurden. Die neuen Wälder hatten eine Rückkopplung ausgelöst, die die Auswirkungen des Klimawandels verstärkt. Das Ergebnis deutete auf die mächtige Kraft hin, die Pflanzen auf das Klima einer Region ausüben könnten.

⁵⁷ Als *Hadley-Zelle* wird das massive „Förderband“ aus Luft bezeichnet, das am Äquator aufsteigt, Regen über die Tropen bringt und als trockene Luft bei etwa 30 Grad nördlicher und südlicher Breite absteigt, wo sich die meisten Wüsten der Welt befinden. Allein durch den Einfluss von Pflanzen hatte sich die Hadley-Zelle nach Norden verschoben.

⁵⁸ https://www.researchgate.net/profile/Douglas_Sheil

⁵⁹ Fernverbindungen sind von periodischen *El-Niño*-Ereignissen bekannt, die seit den 1920er Jahren verstanden werden: Ungewöhnlich warmes Oberflächenwasser im östlichen Pazifik löst starke Regenfälle im westlichen Südamerika und in Afrika sowie Dürren in Südostasien und Australien aus.

⁶⁰ Global land change from 1982 to 2016; <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0411-9>

⁶¹ Malcolm Gladwell, Tipping Point: Wie kleine Dinge Großes bewirken können, Goldmann, München, 2016

⁶² <https://www.hr-inforadio.de/programm/das-interview/klimaforscher-schellnhuber-natuerlich-ist-man-wuetend,interview-schellnhuber-100.html>

⁶³ Der theoretische Ansatz des Kipp-Punktes (*tipping point*) kann als ein Spezialfall des 2. Grundgesetzes der Dialektik (Umschlag von Quantität in Qualität) von Friedrich Engels, entwickelt in den Schriften *Dialektik der Natur* und *Anti-Dühring*, angesehen werden – basierend auf Arbeiten von Georg.W.F. Hegel.

werden die CO₂-Aufnahme aus der Atmosphäre und seine Speicherung zunehmen, was wesentlicher Bestandteil der sogenannten „negativen Emissionen“ sein dürfte. Gleiches gelte aber auch für die Absorption von Wärmestrahlung, denn Wälder repräsentieren „dunkle Körper“ im Sinne des *Stefan-Boltzmann*-Gesetzes. In den Wäldern steigt sodann die Temperatur, u.a. gefolgt von einem Effekt der Wärmeabgabe an die Atmosphäre. Er verbindet sich mit jenem der Rückstrahlung von Energie durch die „weißen Gebiete“ der Erdoberfläche. Dies könnte in einer noch unbekannten Zukunft die Wirkung der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre durch die Pflanzenwelt kompensieren und ihren Einfluss auf das Klima umkehren. Doch auch dies ist nur geradlinig gedacht, was von Folgendem nahegelegt wird: Während der tropische Wald in normalen Jahren *ca.* 2 Milliarden t CO₂ absorbiert, entließ er 2005 allein durch das erhöhte Baumsterben infolge einer ungewöhnlichen Dürre *ca.* 3 Milliarden t jenes Treibhausgases. Zusammen mit Rodungsfeuern, die damals 25 000 km² Land verwüsteten, gelangten *ca.* 5 Milliarden Tonnen CO₂ zusätzlich in die Atmosphäre – mehr als Japan und die Europäische Union pro Jahr gemeinsam emittierten.

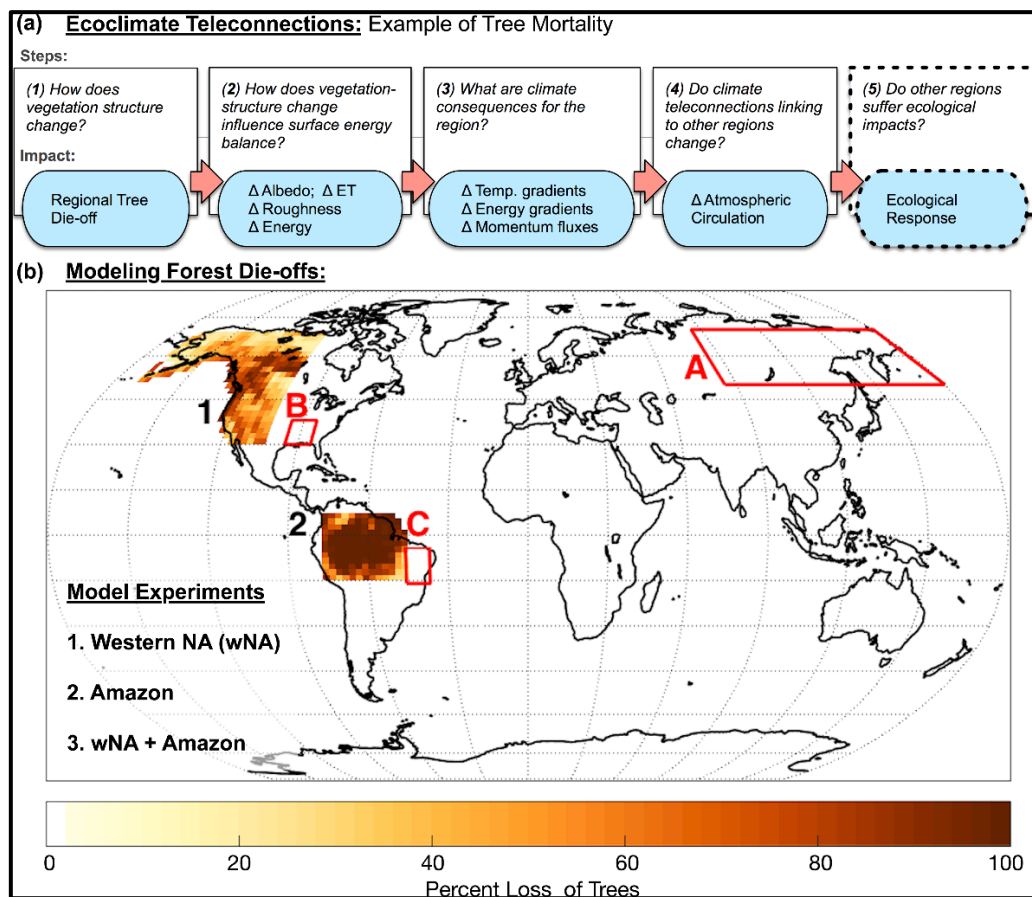


Bild 12. Ergebnisse von Computer-Experimenten mit verschiedenen Modell-Annahmen zu ökoklimatischen Fernwirkungen (Quelle: ⁶⁰)

Umweltgruppen pflanzen Bäume als Lösung des Klimaproblems. ⁶⁴ Doch niemand denkt daran, dass oder ob diese Wälder anderswo Schäden bewirken oder den Planeten durch geringere Reflexion von Wärmestrahlung zusätzlich erwärmen könnten. So wurden Auswirkungen

⁶⁴ Mit 11,4 Millionen ha ist knapp ein Drittel der Fläche Deutschlands von Wäldern bedeckt. Hier gibt es mehr als 90 Milliarden Bäume, und ihre Anzahl wächst stetig. (<https://www.sdw.de/waldwissen/wald-in-deutschland/waldanteil/>)

von Waldveränderungen auf verschiedene Erscheinungen untersucht. Es zeigte sich, dass die Zerstörung von Wäldern im westlichen Nordamerika die Wälder im östlichen Südamerika kräftiger wachsen ließ und gleichzeitig ihr Wachstum in Europa reduzierte, vgl. Bild 12.⁶⁵ Im oberen Teil dieses Bildes ist zugleich eine mögliche Abfolge jener Teilprozesse benannt, die den ökologischen Rückkopplungen bis zur erhöhten Mortalität des Waldes entsprechen könnten. Allerdings ist Skepsis geboten, wollte man annehmen, dass Wälder allein das gegenwärtige Klima dieser Welt bewahren könnten.⁶⁶

In jüngeren Studien zur Rolle von Wäldern bei der Entwicklung des Erdklimas wird zunehmend auf derartige Rückkopplungen eingegangen. Doch viele Aspekte der Fernwirkungen zwischen Ökologie und Klima sind bislang ungeklärt geblieben. Man glaubt insbesondere, dass Klimamodelle nicht exakt genug seien, um die Biologie der Flora und die Physik der Luftströmungen und Niederschläge zu korrelieren und die sich ergebenden Ergebnisse zu deuten. Beispielsweise führen verschiedene Simulationen bei gleichen Eingangsdaten oft zu unterschiedlichen Vorhersagen klimatischer Entwicklungen. Damit sei bislang erschwert, etwas Eindeutiges über die Einflüsse der realen biologischen Welt in solider Weise auszusagen. Dazu gehöre des Weiteren die Kenntnis mikrobiologischer Erscheinungen, z.B. auch zu wissen, wie sich Bäume veränderten äußeren Umständen anpassen können oder sterben.^{67, 68} Mehr noch, keines der verwendeten Modelle berücksichtigt den Einfluss der Pflanzen auf das Klima in vollständiger Weise. Es herrscht noch die historisch überholte Ansicht, dass die Klimawissenschaft vor allem physikalische Phänomene betrachten solle. Es kommt hinzu, dass seit Jahren die Wolken als größte Unsicherheit in den Simulationsmodellen angesehen werden, vgl.⁶⁹ Wolken kühlen den Planeten, indem sie einfallendes Sonnenlicht reflektieren. Aber sie erwärmen den Planeten auch, weil sie aus dem Treibhausgas Wasserdampf bestehen. Die Modelle differieren deutlich in der Frage, welche Menge Wasserdampfes künftig zur Kühlung bzw. Erwärmung des Planeten beitragen werde und ob damit eine Verdoppelung des atmosphärischen Gehalts an CO₂ beherrschbar oder problematisch oder wirklich katastrophal wäre. Auch hier gibt es Zusammenhänge, denn Wälder geben Wasser ab, und sie erzeugen damit Wolken. Die Prozesse der Hydrosphäre sind sehr eng mit jenen der Atmosphäre verbunden und haben einen besonders hohen Einfluss auf das Klima. Ozeane speichern und transportieren Wärme, was zu regionalen Temperaturunterschieden führt. Beispielsweise ist das Klima in Europa stark durch den wärmenden Golfstrom bestimmt. In der Atmosphäre hat Wasser in Form von Wolken oder Wasserdampf einen maßgeblichen Einfluss darauf, wie viel Sonneneinstrahlung reflektiert wird (Wolken) und wie durchlässig die Atmosphäre für langwellige Wärmestrahlung ist (Wasserdampf). Daher bleiben Waldmodelle für klimatische Prozesse ohne ein genaues Bild vom Wirken der Wolken unvollständig.

Die Klimawissenschaft muss und wird künftig vor allem im Grenzgebiet zwischen Biologie und Physik entscheidende neue Erkenntnisse zum Verständnis des Klimawandels und für die Antwort der Menschen auf diesen erarbeiten.

⁶⁵ E.S. Garcia, A.L.S. Swann, J.C. Villegas, D.D. Breshears, D.J. Law, S. Saleska, and S.C. Stark, Synergistic ecoclimate teleconnections from forest loss in different regions structure global ecological responses, PLoS One, **11**(11), 2016 [e0165042]; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165042>

⁶⁶ <http://www.wald.org/docs/agwac11.htm#TOP>

Positionspapier vom 20. Juli 2001 von Verbänden der AG Wald im Forum Umwelt und Entwicklung

⁶⁷ <https://www.hcn.org/issues/45.21/the-tree-coroners/view>

⁶⁸ http://waldundklima.net/klima/wald_klima_01t4.php

⁶⁹ https://www.researchgate.net/publication/328463010_Gesagtes_und_Nichtgesagtes_zum_Klimawandel

Angesichts des vorstehend Gesagten mag Skepsis geboten sein, wollte man die fast allseits akzeptierte Auffassung von der drohenden Gefahr eines Klimawandels allein oder überwiegend dem Anstieg der Konzentration des Kohlendioxids in der Erdatmosphäre – und damit dem in dieser Weise definierten *anthropogenen Treibhauseffekt* – zuschreiben. Es gibt noch andere Folgen menschlichen Handelns sowie in diesem Beitrag nicht benannter natürlicher Prozesse, und nicht zuletzt gibt es die Flexibilität der Natur dieser Erde.

Für ein mögliches Desaster gibt es zwei grundsätzliche Botschaften, eine negative und eine positive.

Die negative Botschaft lautet:

*A state-of-the-art supercomputer simulation indicates
that a feedback loop between global warming and cloud loss
can push Earth's climate past a disastrous tipping point in as little as a century.*

Natalie Wolchover, * 1986

Die positive Botschaft lautet:

*Es wird zu einem Klima kommen, wie es viele Millionen Jahre auf der Erde geherrscht hat.
In diesen Jahrmillionen war die Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre fünfmal,
zeitweise sogar zehnmal höher als heute, dabei gab es eine reiche Vegetation und Tierwelt -
die klimatischen Zustände von damals können also nicht als gefährlich betrachtet werden.*

Michail I. Budyko, 1920-2001