Stefan Brönnimann

«Perpetuirliches Zusammenwirken» – Das Klima als System

in: *Alexander von Humboldt – Wissenschaften zusammendenken*, hgg. im Auftrag des Collegium generale von Sara Kviat Bloch, Oliver Lubrich und Hubert Steinke. Bern: Haupt Verlag 2021 (Berner Universitätsschriften 62), S.127-147.

BERN OPEN PUBLISHING
UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK BERN
DOI: 10.36950/BUS.62.6

source: https://doi.org/10.48350/151730 | downloaded: 20.4.2024

«Perpetuirliches Zusammenwirken» – Das Klima als System

Stefan Brönnimann

1. Einleitung

Die menschgemachte Veränderung des globalen Klimas gehört zu den vordringlichsten Problemen unserer und zukünftiger Gesellschaften. Dabei erhöht sich nicht nur die bodennahe Lufttemperatur, auch die Meere erwärmen sich, polare Eisschilde und Gletscher schmelzen, Niederschlags- und Trockenzonen verschieben sich, der Meeresspiegel steigt. Tiere und Pflanzen finden veränderte Lebensbedingungen vor, an die sie sich zum Teil nicht anpassen können. Der Mensch ist in vielfacher Weise betroffen und muss sich überlegen, wie er den Klimawandel noch abschwächen und sich auf die Veränderungen einstellen kann. Die Ursache ist einfach, die Folgen sind komplex. Die Veränderung einer einzelnen Größe, des Treibhausgasgehalts der Atmosphäre, zieht eine Reihe weiterer Veränderungen nach sich. Wie lässt sich dies konzeptionell erfassen, noch dazu, wenn der Mensch auch weitere Klima- und Umweltbedingungen verändert? Wir sind es gewohnt, im Zusammenhang mit den komplexen Auswirkungen des menschgemachten Klimawandels auf das «Klimasystem» zu verweisen, dessen komplizierte Reaktion auf eine Störung zu den genannten Folgen führt. In meinem Beitrag möchte ich diesem Systemdenken nachspüren. Wie ich zeigen werde, finden wir bei Alexander von Humboldt ein ähnliches Denken.[1]

Das betrifft zunächst die Position des Menschen im System, denn inmitten der globalen Veränderungen steht der Mensch. Er ist gleichzeitig Verursacher, Betroffener und darüber Nachdenkender – eine Perspektive, die auch Alexander von Humboldt eingenommen hat. In seiner bekanntesten Klimadefinition im *Kosmos* (1845) bestimmte er den Begriff Klima folgendermassen: «Der Ausdruck Klima bezeichnet in seinem allgemeinsten Sinne alle Veränderun-

1 Dieser Beitrag beruht zu einem kleineren Teil auf dem Vorwort zu Humboldts Klimaschriften: Stefan Brönnimann und Martin Claussen, «Vorwort», in: Alexander von Humboldt, *Ueber die Hauptursachen der Temperatur-Verschiedenheit auf dem Erdkörper: Meteorologische und Klimatologische Schriften*, herausgegeben von Michael Strobl, Hannover: Wehrhahn 2020 (im Druck).

gen in der Atmosphäre, die unsere Organe merklich afficiren.»[2] Klima wird hier definiert als das, was uns beeinflusst. Aber auch die Umkehrung, also der Einfluss menschlichen Tuns auf das Klima, ist bei Humboldt vertreten. Darauf werde ich im letzten Abschnitt eingehen.

Beginnen möchte ich aber mit einer zweiten, etwas weniger bekannten, aber umso bemerkenswerteren Klimadefinition, die ebenfalls im *Kosmos* steht:

> Das Wort Klima bezeichnet allerdings zuerst eine specifische Beschaffenheit des Luftkreises, aber diese Beschaffenheit ist abhängig von dem perpetuirlichen Zusammenwirken einer all- und tiefbewegten, durch Strömungen von ganz entgegengesetzter Temperatur durchfurchten Meeresfläche mit der wärmestrahlenden trockenen Erde, die mannigfaltig gegliedert, erhöht, gefärbt, nackt oder mit Wald und Kräutern bedeckt ist.[3]

Damit beschreibt Humboldt recht genau das heutige Konzept des Erdsystems oder «earth system».[4] Klima in dieser Definition ist das Ergebnis der Wirkungsweise eines Systems. Zwar verwendet Humboldt den Begriff selbst nicht in dem Sinn.[5] Aber wie ich in diesem Beitrag zeige, stecken in seiner Definition fast alle Elemente einer heutigen Erdsystembeschreibung.

---

2 Alexander von Humboldt, *Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*, 5 Bände, Stuttgart/Tübingen: Cotta 1845–1862, Band 1, S. 340.

3 Ebd., S. 304.

4 Der Systembegriff wurde im 18. Jahrhundert noch oft auf philosophische Auffassungen oder Lehrgebäude bezogen (gegen ein solches abstraktes, starres Systemdenken wehrte sich Humboldt). Der Begriff wurde zunehmend aber auch in einem dem heutigen Verständnis ähnlichem Sinn gebraucht, wobei es «mechanistische» (reduktionistische) und «organistische» (holistische und zweckorientierte) Auffassungen gab (beispielweise bei Immanuel Kant, *Kritik der Urteilskraft*, 1790); vgl. Kirsten von Elverfeldt, *Systemtheorie in der Geomorphologie. Problemfelder, erkenntnistheoretische Konsequenzen und praktische Implikationen* (Erdkundliches Wissen, Band 151), Stuttgart: Franz Steiner 2012. Heutige Systemtheorien in den Geowissenschaften gehen auf die 1950er Jahre zurück.

5 Humboldt selbst verwendete den Begriff leicht anders, im Sinn von Klimazonen: «In den Bergebenen des Königreichs Quito und in Neu-Granada […] steigen die mittleren Temperaturen, trotz der nächtlichen Ausstrahlung 2° bis 3° höher, als man, bey gleicher Höhe und demselben Climaten-System an dem schroffen Abhange der Cordilleren es bemerkt.» Alexander von Humboldt, «Untere Gränze des ewigen Schnees auf dem Himalaya-Gebirge und in den Gegenden des Aequators», in: *Isis* 5 (1821), Spalten 551–577, hier: Spalte 574.

2. Was ist ein System?

Zunächst müssen wir uns fragen, was ein System ist. Gemäß gängiger Definition (z. B. im Oxford Dictionary oder auf Wikipedia) ist ein System eine Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die durch ihre Interaktionen ein sinnvolles Ganzes ergeben. Sie können als eine aufgaben-, sinn- oder zweckorientierte Einheit angesehen werden. Systeme haben als Ganzes ein Verhalten. In der Wissenschaft dienen sie der Konzeptualisierung und Vereinfachung der komplexen Realität. So können wir Beziehungen zwischen den Elementen als Austausch von Eigenschaften betrachten. Wir können auf diese Weise zum Beispiel gesellschaftliche oder ökonomische Systeme darstellen. Die Eigenschaften wären hier beispielsweise Geld, Information oder Arbeitskräfte. Abbildung 1 zeigt links eine allgemeine Darstellung eines solchen Systems.

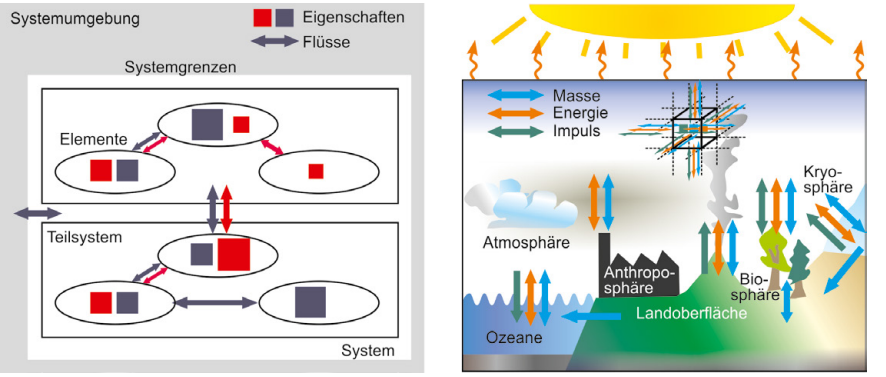

Abbildung 1: Links: Schematische Darstellung eines Systems mit Teilsystemen, Elementen und Beziehungen zwischen den Elementen in Form des Austauschs zweier Eigenschaften. Rechts: Skizze des Klimasystems mit den Teilsystemen Atmosphäre, Ozeane, Landoberfläche, Biosphäre, Kryosphäre und Anthroposphäre, mit gedachten Volumina als Elemente und den ausgetauschten Eigenschaften Masse, Energie und Impuls.

Mit den gleichen Bausteinen können wir auch das Klimasystem oder, weitergefasst, ein Erdsystem definieren.[6] Es besteht aus den Teilsystemen Ozeane,

6 Der Begriff «Earth System Science» entstand in den 1980er Jahren und wurde durch die US-amerikanische Weltraumbehörde NASA und das *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) in der Wissenschaft verankert: Will Steffen, «The emergence and evolution of Earth System Science», in: *Nature Reviews, Earth and Environment* 1 (2020), S. 54–63.

Atmosphäre, Kryosphäre (Eis, Schnee), der Landoberfläche mit Gesteinen und Böden sowie Pflanzen (oder allgemein der Biosphäre[7]). Ein solches System ist in Abbildung 1 rechts dargestellt. Den Menschen können wir uns im Zentrum vorstellen (Anthroposphäre), wie bei Humboldts erster der oben genannten Klimadefinitionen. Ihn betreffen die Umweltveränderungen, und er verändert die Umwelt. Im etwas weiter gefassten Begriff Erdsystem ist das menschliche Handeln manchmal mitgedacht, er umfasst auch die sozioökonomische, kulturelle und politische Dimension. Humboldt hätte wohl seine Freude daran! Im Folgenden beschränken wir uns aber auf ein enger gefasstes Klimasystem. Wir versuchen also nicht, auch das menschliche Handeln zu erklären, sondern betrachten lediglich die Folgen menschlichen Tuns – Emissionen von Treibhausgasen und von Aerosolen, Veränderungen der Landoberfläche – als externe, also von den anderen Systemkomponenten unabhängige, Einflussfaktoren (daher wird in Abbildung 1 eine Fabrik und nicht ein Mensch gezeigt).

In einem Klimasystem werden stets nur genau drei Eigenschaften betrachtet: Energie, Masse und Impuls. Der Austausch von Energie erfolgt durch Strahlung, durch Ströme fühlbarer Wärme oder latenter Wärme (Verdunstung) oder durch biologische oder chemische Prozesse. Energie kann aber auch als Bewegungsenergie oder potentielle Energie (Lageenergie) vorliegen. Impuls wird durch Strömungen in Atmosphäre und Ozean ausgetauscht. Die Masse umfasst Luft, Wasser, Spurengase und Spurenelemente. Den Massenaustausch beschreiben wir oft als Kreislauf: Wasserkreislauf und Kohlenstoffkreislauf sind die bekanntesten Beispiele. Nicht gezeichnet, sondern nur angedeutet sind die Elemente (und entsprechend die Speicherung von Eigenschaften darin), denn Atmosphäre und Ozeane sind Kontinuen. Elemente können gedachte Teile davon sein, beispielsweise kleine Luft- oder Wasservolumina.

Wenn wir von Systemen sprechen, müssen wir auch deren Grenzen definieren. Wir betrachten hier ein globales System. Die obere Grenze ist die Obergrenze der Atmosphäre, die untere ist der Übergang zum festen Erdkörper, in welchem die Prozesse zu langsam sind, um für die Klimatologie rele-

---

7 Der Biogeochemiker Vladimir Vernadsky führte den Begriff «Biosphäre» in den 1920er Jahren ein: Vladimir Vernadsky, *Biosphera (The Biosphere),* Leningrad: Nauchnoe khimiko-technicheskoye izdatel'stvo (Scientific Chemico-Technical Publishing) 1926.

vant zu sein. Das so definierte System ist nun nicht mehr nur eine gedankliche Konzeptualisierung, die uns erlaubt, uns mit dem komplexen Phänomen des Klimawandels überhaupt auseinanderzusetzen. Es erlaubt auch eine mathematische Beschreibung. Denn für ein globales System lassen sich Erhaltungssätze definieren: Die Masse bleibt erhalten, der Impuls bleibt erhalten, die Energie bleibt erhalten (das heisst die Erde befindet sich annähernd in einem Strahlungsgleichgewicht mit dem Weltall). Aus diesen Erhaltungssätzen lassen sich Grundgleichungen herleiten, mit deren Hilfe sich der Systemzustand beschreiben und vorhersagen lässt (dazu mehr in Abschnitt 5).

Damit wird die Bedeutung der Klimasystemsichtweise für die heutige Forschung deutlich: Mit der Computersimulation wird die Konzeptualisierung des Klimas als System zur Grundlage eines Modells. Numerische Modelle wiederum sind zu den wohl wichtigsten Werkzeugen der Klimaforschung geworden. Daher ist die Frage nach der Geschichte und den Vorläufern der Systemsicht aus heutiger Sicht relevant. Und dabei nimmt Humboldt eine wichtige oder zumindest eine äußerst interessante Position ein. Wenden wir uns also Humboldts Werk zu.

3. Masse: Biogeochemische Kreisläufe

Humboldts Beschäftigung mit der Klimawissenschaft begann mit einem Fachgebiet, das heute als biogeochemische Kreisläufe («biogeochemical cycles») bezeichnet wird. Er beschäftigte sich (auch in seiner Funktion als Oberbergrat) mit der Geologie, aber auch mit der Zusammensetzung der Luft in Bergwerkschächten, noch heute als «Wetter» bezeichnet. Giftige Grubengase stellten eine große Gefahr für Gesundheit und Leben der Menschen in den Bergwerken dar. Diese Situation wollte Humboldt verbessern und gleichzeitig das Studium der Grubenatmosphäre für die Wissenschaft erschließen. Er baute Messgeräte, entwarf ein Atemschutzgerät und interessierte sich für die geochemischen Vorgänge. Den «unterirdischen Himmel» gelte es zu erforschen, denn: «Alles im beweglichen Elemente ist gegenwirkend und mischend».[8] Ein besonderes Interesse galt Gewächsen und Pilzen, welche auch unter extremen

8 Alexander von Humboldt, «Ueber Grubenwetter und die Verbreitung des Kohlenstoffs in geognostischer Hinsicht», in: *Chemische Annalen für die Freunde der Naturlehre, Arzneygelahrtheit, Haushaltungskunst und Manufakturen* 2 (1795), S. 99–119.

Umweltbedingungen in Bergwerken gedeihen konnten. Humboldt publizierte mehrere Schriften in Fachzeitschriften zu diesen Themen. Es ist durchaus eine sehr disziplinäre Forschung, die Humboldt hier betrieb.

Bald öffnete Humboldt seine Perspektive von diesem begrenzten biogeochemischen System unter Tage und blickte auf die gesamte Erde. Er beschäftigte sich mit der Wechselwirkung zwischen Böden und der Atmosphäre, insbesondere mit den Kreisläufen von Wasser- und Kohlenstoff sowie Stickstoff. Dabei hatte er immer beides, Wissenschaft und praktische Anwendungen – wie beispielsweise die Verbesserung der Landwirtschaft – im Sinn.[9] Folgendes Zitat zeigt, wie Humboldt die Biogeochemie als Schnittstelle zwischen den Teilsystemen erkannte: «Ich habe geglaubt, diese Ideen über den Wasser- und Kohlenstoff darstellen zu müssen, da die Oxyde eine so wichtige Rolle in der Meteorologie und in der Oekonomie organisierter Wesen spielen.»[10]

Ein wichtiges Forschungsgebiet Humboldts betraf die Zusammensetzung der Atmosphäre («Zerlegung des Luftkreises»,[11] in seinen Worten), zu welcher er experimentelle Arbeiten durchführte (siehe Abbildung 2). Humboldt maß die Konzentrationen von Sauerstoff, aber auch von Spurengasen wie CO_2 und mutmaßte über das Vorkommen weiterer Gase. Nicht zu vergessen ist sein fundamentaler Beitrag mit Joseph Louis Gay-Lussac,[12] in welchem die beiden anhand zahlreicher Versuche die volumetrische Zusammensetzung von Wasser entdeckten: zwei Teile Wasserstoff, ein Teil Sauerstoff. Zur Formel H_2O fehlte allerdings noch die Teilchenzahl pro Volumen respektive die Erkenntnis, dass diese für jedes Gas gleich ist – eine Erkenntnis, zu der einige Jahre später, aufbauend auf der Arbeit von Humboldt und Gay-Lussac, Amedeo Avogadro gelangte.[13]

---

9 Ulrich Stottmeister, «Umweltgedanken zu Alexander von Humboldt», in: *Alexander von Humboldt im Netz* 18:35 (2017), S. 80.

10 Alexander von Humboldt, «Beobachtungen über die Absorbtion des Sauerstoffs vermittelst der Erden, und Bemerkungen über den Einfluß dieser Operation auf die Ackerbaukunst», in: *Archiv der Agriculturchemie für denkende Landwirthe* 1:1 (1803/1804), S. 151–182, hier: S. 170.

11 Alexander von Humboldt, «Versuche über die chemische Zerlegung des Luftkreises», in: *Annalen der Physik* 3:1 (1799), S. 77–90.

12 Alexander von Humboldt und Joseph Louis Gay-Lussac, «Versuche über die eudiometrischen Mittel und über das Verhältniß der Bestandtheile der Atmosphäre», in: *Annalen der Physik* 20:1 (1805), S. 38–92; 20:2 (1805), S. 129–146.

13 Amedeo Avogadro, «Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaisons», in: *Journal de Physique* 73 (1811), S. 58–76.

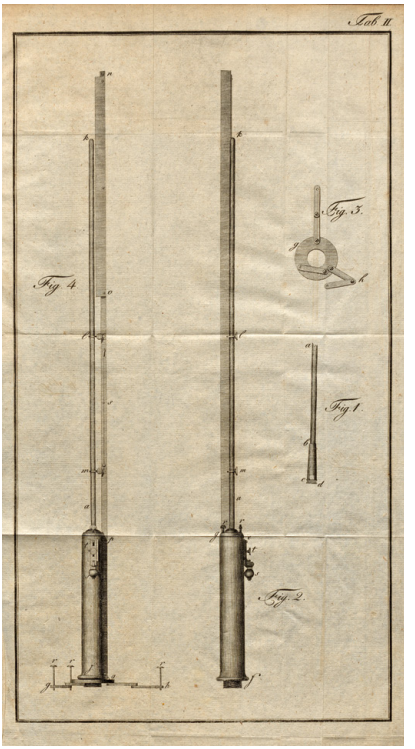

Abbildung 2: In seinem Werk *Versuche über die chemische Zerlegung des Luftkreises* (1799)[14] sind verschiedene Eudiometer und andere Geräte beschrieben (aber leider nicht abgebildet), mit welchen Humboldt seine Experimente durchführte. Diese Grafik aus derselben Publikation zeigt ein von Humboldt verwendetes Senkbarometer.[15]

Mit diesen sehr disziplinären Arbeiten (neben solchen zu Galvanismus, Erdmagnetismus und Geologie) wies sich Humboldt, mit heutigen Worten gesprochen, als ein führender Wissenschaftler im Fachgebiet biogeochemischer Kreisläufe aus. Dies ist auch gegenwärtig noch ein Kerngebiet der Erdsystemmodellierung, das die Schnittstelle zwischen Geo-, Bio- und Atmosphäre betrifft.

14 Humboldt 1799, Tafel II.

15 Alexander von Humboldt, *Das graphische Gesamtwerk*, herausgegeben von Oliver Lubrich, Darmstadt: Lambert Schneider 2014.

4. Energie: Strahlung und turbulente Wärmeflüsse

Auch das zweite zentrale Thema der Erdsystem-Perspektive, die Energie, musste Humboldt interessieren. Und es erstaunt nicht, dass auch dazu spezifische Schriften vorhanden sind. Im *Versuch über die astronomische Strahlenbrechung in der heissen Zone für Höhenwinkel unter 10°, insofern sie von der Wärmeabnahme abhängt* (1809) befasste er sich im Detail mit der Strahlung, der Energiebilanz der Erdoberfläche und dem vertikalen Temperaturgradienten:

> Wäre unsere Erde bloβ ein aus Gas bestehendes […] Sphäroid […] so würde sie nur in so weit von den Sonnenstrahlen erwärmt werden, als das Licht beim Übergehen in dichtere oder dünnere Luftschichten geschwächt wird. […] Wenn ein solches Sphäroid einen festen Kern hat, so treten zwei andre Ursachen der Erwärmung ein […]: die Strahlung der Wärme und die aufsteigenden Luftströme.[16]

Humboldt abstrahierte hier die Erde zu einem Gasball und leitete die dort vorhandenen Energieflüsse her. Erwärmung wäre allein die Folge von Strahlungsflusskonvergenz. Dann erhöhte er die Komplexität und andere Prozesse treten dazu. Langwellige Abstrahlung kommt ins Spiel sowie turbulente Wärmeflüsse. Über die Wichtigkeit der einzelnen Vorgänge äußerte Humboldt sich nur vage – zukünftige Arbeiten müssten dies erörtern. Weiter ging Humboldt auf verschiedene Oberflächen ein und deren Einfluss auf die Temperaturabnahme mit der Höhe. Das obige Zitat, das von der größtmöglichen Abstraktion ausgeht, beschreibt ein einfaches physikalisches System, ein Konzept für ein Modell. Erst nach einem längeren theoretischen Teil verglich der große Empiriker Temperaturmessungen in verschiedenen Höhen und verschiedenen Teilen der Erde.

Aus sehr ähnlichen Überlegungen entstand viel später das Konzept des «strahlungskonvektiven Gleichgewichts» der Atmosphäre. In diesem Konzept ist die Troposphäre, die unterste Schicht der Atmosphäre, die etwa 8 bis 16 Kilometer umfasst, in einem Gleichgewicht zwischen dem Wärmefluss vom Boden in die Atmosphäre durch Konvektion und Abstrahlung aus der Atmosphäre in den Weltraum. Das vertikale Temperaturprofil in der Troposphäre

16 Alexander von Humboldt, «Versuch über die astronomische Strahlenbrechung in der heissen Zone für Höhenwinkel unter 10°, insofern sie von der Wärmeabnahme abhängt», in: *Annalen der Physik* 31:4 (1809), S. 337–397, hier: S. 361.

wird dadurch bestimmt, dass sich Luft beim konvektiven Aufsteigen abkühlt. Die Stratosphäre darüber befindet sich dagegen in einem reinen Strahlungsgleichgewicht. Das vertikale Temperaturprofil in der Stratosphäre wird durch die Ozonschicht – und damit durch photochemische Vorgänge und Strahlungsprozesse – bestimmt, während Vertikalbewegungen unterdrückt sind. Dieses Konzept wurde in den 1960er Jahren durch Syukuro Manabe und Robert Strickler am Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) erstmals in einem numerischen Modell simuliert (siehe Abbildung 3).[17]

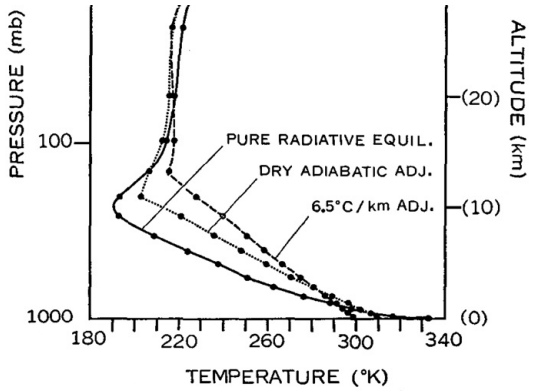

Abbildung 3: Simulation des Vertikalprofils der Temperatur in den untersten 25 Kilometern der Atmosphäre für 35° Nord im April in einem eindimensionalen (vertikalen) Klimamodell unter verschiedenen Annahmen (aus der Arbeit von Manabe und Strickler von 1964[18]). Durchgezogene Linie: Vertikaler Energieaustausch erfolgt nur durch Strahlung (Strahlungsgleichgewicht). Gepunktete Linie: Neben Strahlung findet auch Konvektion statt, allerdings nur mit trockener Luft. Gestrichelte Linie: in feuchter Luft stellt sich ein Temperaturgradient von 6,5 Grad °C pro Kilometer ein.

Auch in dieser Arbeit wird zunächst von einer nur durch Strahlungsprozesse beeinflussten Atmosphäre ausgegangen und das daraus resultierende Temperaturprofil gerechnet. In der Troposphäre ist Strahlung allerdings eine sehr ineffiziente Methode des Energietransports. Die Erdoberfläche müsste sich enorm stark aufheizen, um die von der Sonne eingestrahlte Energie allein

17 Syukuro Manabe und Robert F. Strickler, «Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment», in: *Journal of Atmospheric Sciences* 21 (1964), S. 361–385.

18 Ebd., Fig. 4.

mittels langwelliger Strahlung durch die gesamte Atmosphäre hindurch in den Weltraum abgeben zu können. Die Temperatur würde dann in der Atmosphäre sehr schnell abnehmen, und zwar um 150 Grad Celsius innerhalb von 10 Kilometern. Dies ist natürlich ein rein hypothetisches Resultat, denn unter solchen Verhältnissen würde sofort Konvektion, in Humboldts Worten «aufsteigende Luftströme», einsetzen. In einer zweiten Simulation ließen Manabe und Strickler deshalb turbulenten Wärmefluss durch Konvektion zu, zunächst aber nur mit trockener Luft. Es stellt sich der sogenannte trockenadiabatische Temperaturgradient ein, also eine Temperaturabnahme von ca. 10 Grad Celsius pro Kilometer.[19] Der Energieaustausch durch Konvektion ist also effizienter als durch Strahlung allein. Realistisch wird das Vertikalprofil aber erst, wenn Wasserdampf und damit die Energieumwandlung durch Verdunstung und Kondensation mitberücksichtigt wird. Dadurch wird der Energietransport durch Konvektion noch effizienter. Es entsteht ein mittlerer Gradient von 6,5 Grad Celsius pro Kilometer. In der Stratosphäre unterscheiden sich die Kurven kaum, hier herrscht Strahlungsgleichgewicht.

Die Temperaturabnahme mit der Höhe (und die räumliche Variation dieser Temperaturabnahme) war für Humboldt von zentralem Interesse. Er setzte sich in zahlreichen Schriften damit auseinander, verglich seine Messungen mit denen anderer Wissenschaftler und fand empirisch eine langsamere Temperaturabnahme in kalten Klimaten (wie sie auch im unteren Teil seiner berühmten Skizze zu den Isothermen dargestellt ist[20]). Die Temperaturabnahme mit der Höhe ist einer der Faktoren (nicht der einzige), der die Höhe der Schneegrenze und die Höhenstufen der Pflanzen bestimmt. Dazu hat Humboldt sein Leben lang gearbeitet und publiziert (vgl. Abschnitt 6).

Zu einer stringenten physikalischen Theorie des vertikalen Temperaturgradienten kam Humboldt allerdings nicht. Der Schritt zur Quantifizierung seiner richtigen Überlegungen blieb ihm versagt. Zwar waren die Gasgesetze von Amonton (bei gleichem Volumen bleibt das Verhältnis von Druck zu Temperatur konstant), Boyle-Mariotte (bei gleicher Temperatur bleibt das

---

19 Der trockenadiabatische Temperaturgradient Γ kann ausgedrückt werden als das Verhältnis der Schwerebeschleunigung der Erde und der spezifischen Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck: $\Gamma = g/c_p$.

20 Alexander von Humboldt, «Des lignes isothermes et de la distribution de la chaleur sur le globe», in: *Annales de Chimie et de Physique* 5 (1817), S. 102–112.

Produkt aus Druck und Volumen konstant) und ab 1802 auch dasjenige von Gay-Lussac (bei gleichem Druck bleibt das Verhältnis von Volumen und Temperatur konstant) bekannt. Aber noch fehlte eine kinetische Gastheorie,[21] und es fehlte die atmosphärische Thermodynamik, die sich erst relativ spät entwickelte. Energieerhaltung und der erste Hauptsatz der Thermodynamik wurden erst um die Jahrhundertmitte brauchbar formuliert. Daraus konnte die trockenadiabatische Temperaturabnahme zunächst als Funktion des Drucks (die sogenannte Poisson-Gleichung) berechnet werden. Erst in den 1860er Jahren leitete William Thomson (der spätere Lord Kelvin) den trocken- und feuchtadiabatischen Temperaturgradienten her.[22] Humboldt war natürlich weit davon entfernt, solche theoretischen Beiträge zu liefern.

Trotzdem sind Humboldts Abstraktion der Erde als Gasball und die Parallele zur Arbeit von Syukuro Manabe und Robert Strickler interessant. Denn letztere beschreibt gleichzeitig das erste numerische Klimamodell. Zwar war es zunächst bloß ein eindimensionales Modell (nur die vertikale Dimension, ein sogenanntes *radiative convective model*, RCM). Aber damit ließen sich nun neue Berechnungen zum Treibhauseffekt von CO_2 durchführen, die alle Vorgänge (Konvektion, Feuchte, Strahlung) berücksichtigten.[23] Bald wurde auch der Ozean mitberücksichtigt. Dieser Strang von Arbeiten ist einer der Ursprünge der heutigen Erdsystemmodellierung und damit auch der heutigen Klimasystemsichtweise. Humboldt, mit seinem abstrakten Gasball, steht dieser Arbeit allerdings nicht Pate – er war längst vergessen.

5. Impuls: Strömungen in Atmosphäre und Ozean

Vom eindimensionalen RCM zum dreidimensionalen Wetter- und Klimamodell fehlt die Betrachtung des Impulses. Aus der Impulserhaltung lassen sich die auf Newton zurückgehenden Bewegungsgleichungen, auch bekannt als Navier-Stokes-Gleichungen, herleiten. Vilhelm Bjerknes war 1904 der erste,

---

21 Emile Clapeyron, «Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur», in: *Journal de l'École Polytechnique* 14 (1834), S. 153–190.

22 J. E. McDonald, «Early Developments in the Theory of the Saturated Adiabatic Process», in: *Bulletin of the American Meteorological Society* 44 (1963), S. 203–211.

23 Syukuro Manabe und Richard T. Wetherald, «Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity», in: *Journal of the Atmospheric Sciences* 24 (1967), S. 241–259.

der den vollständigen, auf Impuls-, Massen- und Energieerhaltung sowie der Gasgleichung beruhenden Satz an Grundgleichungen der Atmosphäre formulierte.[24] Dieser Gleichungssatz liegt heute jedem Wettervorhersagemodell zugrunde. In den 1950er und 1960er Jahren wurden am GFDL und anderswo erste dreidimensionale Modelle der Atmosphäre und des Ozeans entwickelt.[25] Humboldt war von einer solchen theoretischen Beschreibung von Strömungen in Atmosphäre und Ozean scheinbar weit weg. Aber, war er das wirklich?

In einem seiner wenigen ozeanographischen Artikel, «Über die Meeresströmungen im allgemeinen und besonders über eine kalte Meeresströmung an der Westküste von Südamerika» (1837)[26] benannte Humboldt die Antriebsfaktoren der Ozeanströmungen. Diese seien angetrieben durch «anhaltend wehende Winde, Verschiedenheiten der spezifischen Schwere der mehr oder minder erwärmten oder salzigen Theile des Wassers, Veränderung des Barometer-Drucks, durch Anhäufung der Wasser im Meerbusen (wie im Mexikanischen) oder Störung des Niveaus, durch starke Verdunstung (wie im Mittelmeere), endlich durch periodisches Schmelzen des Polar-Eises», modifiziert «durch die Konfiguration der Küsten, durch die Rotation der Erde».[27] Damit sind alle wichtigen Faktoren der Ozeanzirkulation klar und korrekt dargelegt, wenn auch nicht in Form von Gleichungen. Das physikalische Verständnis, inklusive der Interaktion zwischen Atmosphäre, Ozean und Eis, war zweifellos da, Jahrzehnte bevor eine mathematische Beschreibung möglich wurde.

Neben dieser genauen Beschreibung der Prozesse beinhaltet Humboldts Arbeit auch einen unglaublichen Reichtum an Beobachtungen und Einsichten. Humboldt baute auf bestehende Arbeiten auf, korrigierte und berichtigte diese zum Teil, ergänzte und erweiterte sie substantiell, sodass eine globale Perspektive entstand. Unter anderem anhand von Beschreibungen der von Seefahrern gesichteten Seetang-Felder (und einer kritischen Auseinanderset-

---

24 Vilhelm Bjerknes, «Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik», in: *Meteorologische Zeitschrift* 21 (1904), S. 1–7.

25 Paul N. Edwards, *A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming,* Cambridge: MIT Press 2010, S. 209.

26 Alexander von Humboldt, «Über die Meeresströmungen im allgemeinen und besonders über eine kalte Meeresströmung an der Westküste von Südamerika», in: Heinrich Berghaus (Hrsg.), *Allgemeine Länder- und Völkerkunde,* 1. Band, 3. Buch, Stuttgart: Hoffmann'sche Verlags-Buchhandlung 1837, S. 415–423, 575–583, 586–592, 610–611.

27 Humboldt 1837, S. 610 f.

zung mit von anderen dazu geäußerten Mutmaßungen), beschrieb Humboldt die Zirkulation im Atlantik (siehe Abbildung 4). Humboldt beschränkte sich aber nicht auf den Atlantik. Gleich zu Beginn des Artikels wird das Publikum auf eine Reise um die Welt mitgenommen:

> Dieser Strom warmen Wasers [Golfstrom], der seinen frühesten Impuls einer Strömung in der südlichen Hemisphäre, den von Madagaskar aus über die Nadelbank und um das Vorgebirge der guten Hoffnung wirbelnden Wassern, und einem Stoß gegen die vorspringende brasilische Küste beim Kap St. Roque verdankt, nimmt erst von der Spitze von Florida bis zur Bank von Neüfundland eine nordöstliche, von da bis gegen die westlichsten Azoren eine östliche und zuletzt eine südliche Richtung an.[28]

Abbildung 4: Sargassum-Matten im Atlantik: Die Verbreitung dieses Seetangs respektive die Bildung von Tangmatten oder -streifen lässt Rückschlüsse auf die Meeresströmungen zu. Dabei ist die Frage zentral, ob sich diese Algen vegetativ und damit freischwimmend vermehren können (worauf Humboldt hinwies) oder von in der Nähe liegenden Untiefen losgerissen worden sein mussten. Tatsächlich ist *Sargassum natans*, mit welchem Humboldt sich auseinandersetzte, freischwimmend.

28 Humboldt 1837, S. 415.

Humboldt setzte die Strömungen von Madagaskar bis zum Nordatlantik in einen kausalen Zusammenhang. Er sah Meeresströmungen nicht als isolierte Phänomene, sondern als Teile einer globalen Ozeanzirkulation (siehe Abbildung 5 aus dem Atlas von Berghaus; hier sind pazifische und atlantische Meeresströmungen eingetragen).

Schließlich beschrieb er auch die heute nach ihm benannte Strömung an der Westküste Südamerikas (vgl. den Beitrag von Heinz Veit in diesem Band):

> In der Südsee [war], seit den frühesten Zeiten des beginnenden Verkehrs zwischen Chili, Lima und Guayaquil, das Dasein einer großen Meeresströmung von S. nach N. und N.N.W. beobachtet worden. Nur die niedrige Temperatur dieser Meeresströmung und der wichtige Einfluß derselben auf die […] Kühle der Peruanischen Küsten waren bei meiner Ankunft an dem Littoral der Südsee völlig unbekannt.[29]

Zwar beschrieb Humboldt auch die saisonale Erwärmung des Stroms im Nordwinter und spezifische Phänomene wie hin und wieder vorkommende starke Niederschläge in Peru, die wir heute schnell mit dem Klimaphänomen *El Niño* in Zusammenhang bringen würden. Humboldt stellte aber selbst keinen Zusammenhang her. *El Niño* beziehungsweise die *Southern Oscillation* ist die wohl weltweit wichtigste Klimaschaukel; sie entsteht durch Ozean-Atmosphären-Wechselwirkung im Pazifik. Als Entdecker dieser Wechselwirkung kann Humboldt also nicht gelten, obwohl er, typisch für ihn, auch dazu eine Vorahnung hatte[30]: «Nur der mehrjährige Aufenthalt eines Physikers an diesem Gränzpunkte, einer wahren Wetterscheide, würde uns befriedigen können […].»[31] Trotzdem: Seine Beschreibung der Ozeanzirkulation und deren Ursachen sowie die Integration in eine globale Sichtweise fügen sich in das skizzierte Klimasystemdenken ein.

---

29 Humboldt 1837, S. 575.

30 Gerhard Kortum, «‹Alexander von Humboldt› als Name für Forschungsschiffe vor dem Hintergrund seiner meereskundlichen Arbeiten», in: *Alexander von Humboldt im Netz* 3:5 (2002), S. 17.

31 Humboldt 1837, S. 579.

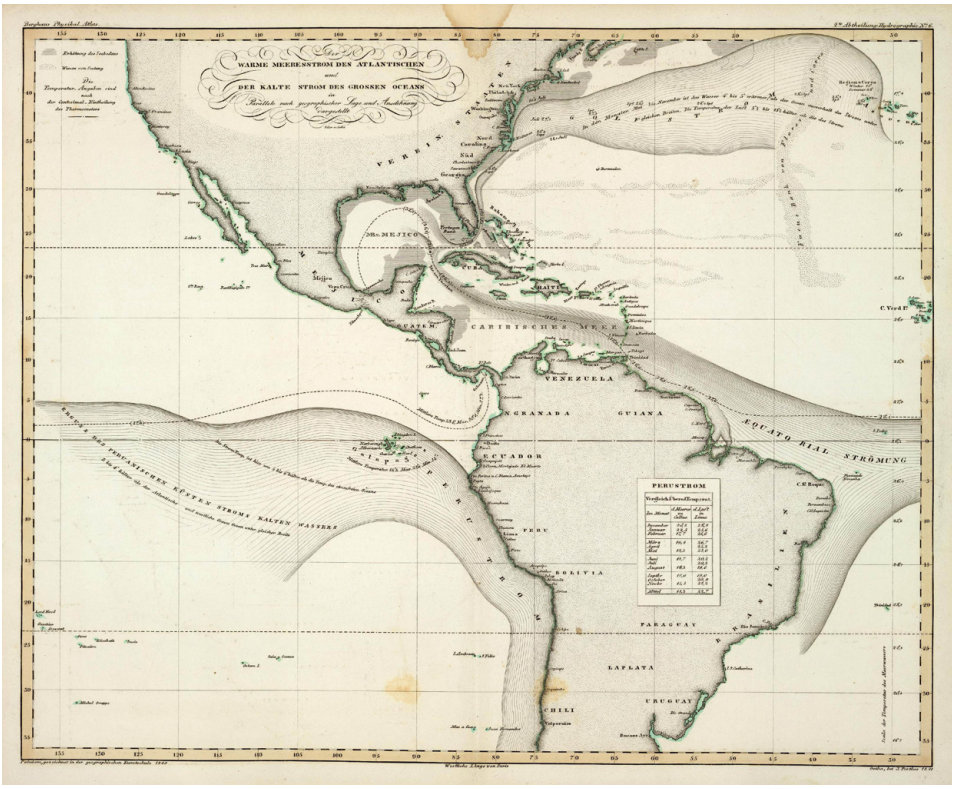

Abbildung 5: Karte «Der warme Meeresstrom des Atlantischen und der kalte Strom des Groβen Oceans» aus dem Atlas von Berghaus.[32] Die Karte enthält zahlreiche Temperaturangaben sowie auch die Lage der Seetang-Felder im Atlantik (siehe Abbildung 4).

6. Landoberfläche, Biosphäre und der Mensch

Lange hatte die Klimaforschung vor allem Ozean und Atmosphäre im Blick. Erst in den letzten ungefähr zwanzig Jahren wurde auch die Rolle der Landoberfläche wieder näher betrachtet.[33] Wieder – denn die Rolle der Landoberflä-

32 Heinrich Berghaus, *Physikalischer Atlas oder Sammlung von Karten, auf denen die hauptsächlichsten Erscheinungen der anorganischen und organischen Natur nach ihrer geographischen Verbreitung und Vertheilung bildlich dargestellt sind,* zu Alexander von Humboldt, *Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung,* herausgegeben von Ottmar Ette und Oliver Lubrich, Frankfurt: Die Andere Bibliothek 2014.

33 Sonia Seneviratne et al., «Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review», in: *Earth-Science Reviews* 99:3–4 (2010), S. 125–161.

che für das Klima war im 18. und 19. Jahrhundert ein vorrangiges Forschungsthema. Auch hier war Humboldt einer der führenden Köpfe. Er interessierte sich zunächst für die Gestalt der Erde, für die räumliche Verschiedenheit und die Höhengliederung, aber auch für die Verteilung der Pflanzen und für die Schneegrenze (vgl. den Beitrag von Heinz Veit in diesem Band). Letztere wird maßgeblich durch das Klima beeinflusst und ist mit diesem in engster Weise verknüpft, sodass Humboldt schreiben konnte: «so stellt der Abhang des Gebirges gleichsam die umgekehrte Scale eines botanischen Thermometers dar».[34] Gleichzeitig beeinflussen Landoberfläche und Vegetation das Klima. Diese Sichtweise wird durch die eingangs zitierte zweite Klimadefinition deutlich (die «wärmestrahlende[n] trockene[nen] Erde, […] mannigfaltig gegliedert, erhöht, gefärbt, nackt oder mit Wald und Kräutern bedeckt»[35]). Auf die biogeochemische Kopplung wurde bereits kurz in Abschnitt 3 eingegangen, in diesem Zitat geht Humboldt auch explizit auf die Energie ein.

Besonders in der Botanik begründete Humboldt ein neues Denken, das über die bloße Taxonomie hinausging (für die Zoologie vgl. den Beitrag von Stefan Hertwig in diesem Band).[36] Humboldt betrachtete die Pflanzen in ihrer Umgebung, erörterte ihre Verbreitung über den Erdball und suchte nach den Ursachen dafür. Die Pflanzengeographie bezeichnete er als «Teil der Physik der Erde».[37] Daher erstaunt es nicht, dass auch im Humboldt'schen Klimasystemdenken die Landoberfläche und insbesondere die Vegetation eine zentrale Rolle spielen.

Heute beschreiben Erdsystemmodelle auch die Wechselwirkung zwischen Biosphäre und Atmosphäre, welche sich auf vielfache Weise vollzieht. Die Vegetation verändert die Helligkeit der Oberfläche (Strahlungsbilanz), aber auch die Verdunstung und die Aufteilung der Energie in fühlbare und latente Wärme (und damit Energiebilanz und Wasserkreislauf). Die Vegetation ver-

---

34 Alexander von Humboldt, «Beobachtungen über das Gesetz der Wärmeabnahme in den höhern Regionen der Atmosphäre, und über die untern Gränzen des ewigen Schnees», in: *Annalen der Physik* 24:1 (1806), S. 1–49.

35 Humboldt 1845-1862, S. 304.

36 Oliver Lubrich, «Wie das Reisen das Denken verändert», in: *Unipress* 174 (2018), S. 10–14; Oliver Lubrich und Adrian Möhl, *Botanik in Bewegung. Humboldts Expeditionen,* Bern: Haupt 2019.

37 Alexander von Humboldt, «Ueber die Gesetze, welche man in der Vertheilung der Pflanzenformen beobachtet», in: Carl Traugott Beilschmied, *Pflanzengeographie*, Breslau: Wilhelm Gottlieb Korn 1831, S. 7–29, hier: S. 26.

ändert außerdem den Kohlenstoffkreislauf, und sie verändert das Mikroklima sowie das lokale Klima. So wissen wir heute, dass Wechselwirkungen zwischen Landoberfläche und Atmosphäre via Böden und Vegetation Hitzewellen verstärken und das zukünftige Klima beeinflussen können.[38] Landoberfläche und Landnutzung sind heute Gegenstand intensivster satellitengestützter Beobachtung. Veränderungen in der Waldfläche oder in Oberflächeneigenschaften wie der Helligkeit, sogar der photosynthetischen Aktivität, können aus dem All beobachtet werden. Als besonders aktuelles Beispiel zeigt Abbildung 6 die weitläufigen Feuer im Amazonasgebiet in der Trockenzeit 2019. Betroffen ist hier einerseits Humboldts Landschaft, aber die Folgen betreffen auch das überregionale Klima, den Wasserhaushalt des ganzen Kontinents und den globalen Kohlenstoffkreislauf. Große Anstrengungen werden gegenwärtig unternommen, pflanzenphysiologische Vorgänge in Klimamodellen besser abbilden zu können, sodass die Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Klima in Modellen simuliert werden können.

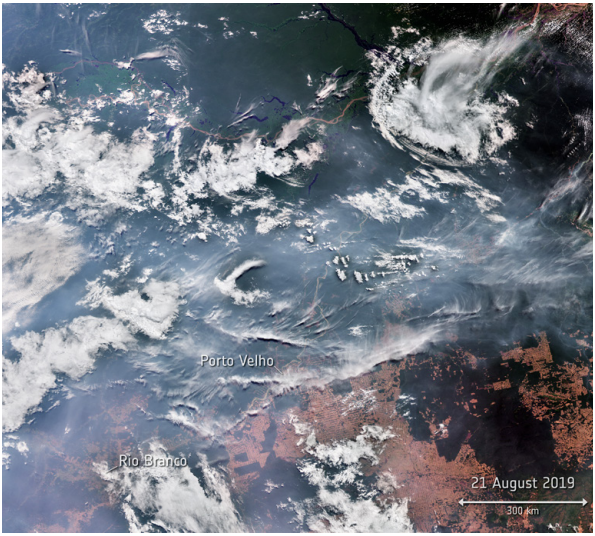

Abbildung 6: Waldbrände in Brasilien, aufgenommen vom Satelliten Copernicus Sentinel-3 am 21. August 2019.

Zum Schluss möchte ich wieder auf den Menschen zu sprechen kommen, der für Humboldt im Zentrum stand und heute im Zeitalter des menschgemachten Klimawandels doppelt im Zentrum steht. Humboldt beobachtete den Ein-

38 Seneviratne et al. 2010.

griff des Menschen in seine Umwelt – und die Rückwirkungen zurück auf den Menschen – anhand verschiedener Beispiele. Berühmt ist etwa seine Betrachtung zum Einfluss der Entwaldung im Einzugsgebiet des Lago Valencia in Venezuela. Humboldt nahm den Menschen ebenfalls klar als Klimafaktor wahr, was an vielen Textstellen deutlich wird. Am bekanntesten ist dabei wohl ein Zitat aus *Asie centrale* (1844):

> Ich hätte diese Betrachtungen […] mit einer Untersuchung der Veränderungen schließen können, welche der Mensch auf der Oberfläche des Festlandes durch das Fällen der Wälder, durch die Veränderung in der Vertheilung der Gewässer und durch die Entwicklung großer Dampf- und Gasmassen an den Mittelpunkten der Industrie hervorbringt. Diese Veränderungen sind ohne Zweifel wichtiger, als man allgemein annimmt.[39]

Damit benannte Humboldt Landnutzungsänderung, Eingriffe in den Wasserkreislauf und Emissionen ganz klar als Klimafaktoren. Aber bereits 35 Jahre vorher hatte er den Einfluss des Menschen auf das Klima durch Veränderung der Landnutzung beschrieben: «der Mensch aber, der Kräuter und Getreidarten dahin pflanzt, wo sonst Wälder standen, stört allmählig das ursprüngliche Gleichgewicht des Luftoceans».[40]

Humboldt war allerdings nicht der erste, der Landnutzungsänderung und Klima zusammenbrachte. Hugh Williamson hatte 1771 in Nordamerika (damals noch englische Kolonie) die Vermutung untersucht, dass sich die Entwaldung und Urbarmachung auf das Klima auswirke.[41] Abbé Mann verknüpfte 1790 diese Diskussion mit der Frage des Klimawandels in Europa seit der Antike und mit der Rolle der Entwaldung und Bewirtschaftung des Landes, aber auch mit der Frage eines generellen Klimatrends.[42] Es folgten zahlreiche weitere Arbeiten. Der Einfluss der Wälder und von Landnutzungs-

---

39 Deutsche Ausgabe: Alexander von Humboldt, *Central-Asien: Untersuchungen* ü*ber die Gebirgsketten und die vergleichende Klimatologie*, übersetzt von Wilhelm Mahlmann, Berlin: Kleemann 1844, S. 214.

40 Humboldt 1809, S. 341.

41 Hugh Williamson, «An attempt to account for the change of climate, which has been observed in the Middle Colonies in North-America», in: *Transactions of the American Philosophical Society* 1 (1771), S. 272–280.

42 Abbé Mann, « Mémoire sur le changement successif de la température & du terroir des climats, averc des recherches sur les causes de ce changement», in: *Historia et Commentationes Academiae Theodoro-Palatinae Physicum* 6 (1790), S. 82–111.

änderungen auf das Klima war damals eine gängige Klimatheorie,[43] und die wissenschaftliche Diskussion darum zog sich durch das ganze 19. Jahrhundert (kritisch zusammengefasst von Eduard Brückner[44]).

Humboldt war aber einer der ersten, der auf industrielle Gase und Aerosole hinwies. Was er genau damit meinte, bleibt unklar. Der Treibhauseffekt der Atmosphäre und deren Beitrag zur Energiebilanz an der Erdoberfläche wurden in den 1820er Jahren durch Joseph Fourier postuliert, die zugrunde liegenden langwelligen Strahlungseigenschaften des CO_2-Moleküls in den 1850er Jahren durch Eunice Foote und John Tyndall.[45] Den Einfluss von emittieren Gasen auf die langwellige Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche konnte Humboldt also wohl kaum gemeint haben. Intuitiver ist der Einfluss von Rauch («Dampf») und Aerosolen. Sichtbare, wahrnehmbare Veränderungen der Atmosphäre sind in Humboldts Klimadefinition ja schon per se Klimaänderungen und Auswirkungen auf andere Klimaelemente sicher naheliegend. Auch Humboldts Freund François Arago äußerte sich zu Klimaauswirkungen der ausgestoßenen Rauchmengen und vermutete einen Einfluss auf den Niederschlag.[46]

Der erste Wissenschaftler, der das vom Menschen ausgestoßene CO_2 als möglichen globalen Klimafaktor betrachtete, wenn auch als weit in der Zukunft liegend und durchaus positiv bewertet, war Svante Arrhenius ein halbes Jahrhundert nach Humboldts *Asie centrale*.[47] Bis mit Guy Stewart Callendar erstmals ein Wissenschaftler eine aktuell ablaufende Klimaerwärmung mit dem vom Menschen ausgestoßenen CO_2 verknüpfte (und wiederum positiv bewertete), dauerte es sogar fast ein Jahrhundert.[48] Humboldt mag als Vordenker des menschlichen Einflusses auf das Klima gelten, aber nicht des men-

43 Stefan Brönnimann, «Picturing climate change», in: *Climate Research* 22 (2002), S. 87–95.

44 Eduard Brückner, *Klimaschwankungen seit 1700 nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit*, Wien: E. Hölzel 1890.

45 Spencer R. Weart, *The Discovery of Global Warming*, Cambridge: Harvard University Press 2003; James Rodger Fleming, *The Callendar Effect. The Life and Work of Guy Stewart Callendar (1898–1964)*, Boston: American Meteorological Society 2007.

46 François Arago, «Notices scientifiques sur la prédiction du temps», in: Œuvres complètes, Paris: Gide 1858, Band 8, S. 1–24.

47 Svante Arrhenius, «On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground», in: *Philosophical Magazine and Journal of Science* 5:41 (1896), S. 237–276.

48 Guy Stewart Calendar, «The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature», in: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 64 (1938), S. 223–241.

schengemachten Treibhauseffekts. Zwar sah er klar den Menschen durch dessen Umgestaltung der Landoberfläche und durch dessen Emissionen als Klimafaktor an, aber Humboldt scheint sich hier auf lokale oder regionale Klimaänderungen zu beziehen. Eine globale, menschengemachte Klimaänderung war noch nicht denkbar, obwohl Humboldts Klimasystemdenken uns heute genau die Untersuchung der globalen Konsequenzen ermöglicht. Damit sind wir wieder bei unserem Ausgangspunkt angekommen.

7. Fazit

Humboldts Verständnis des Klimasystems erscheint aus gegenwärtiger Sicht als wegweisend. Es ist heute abgebildet in Erdsystemmodellen. Seine eingangs erwähnte zweite Klimadefinition benennt die Sphären (Luftkreis, Meeresfläche, trockene Erde, Wald und Kräuter), die Bewegungsvorgänge (Strömungen), die zentrale Rolle der Strahlung (wärmestrahlende Erde) und die räumliche Ungleichheit der thermischen Faktoren als Antrieb. Sie benennt in erster Linie aber das Zusammenspiel aller Elemente in einem System, die dadurch ein sinnvolles Ganzes ergeben – das «perpetuirliche Zusammenwirken» eben, oder wie es im Reisetagebuch von 1803 heißt: «Alles ist Wechselwirkung».[49] Humboldts Arbeiten weisen auf die Wichtigkeit der Schnittstellen hin, auf die Rolle der Biosphäre und biogeochemischer Vorgänge – und insbesondere auf die Stellung des Menschen.

Humboldts Werk lässt sich somit aus heutiger Sicht leicht einordnen. Trotzdem war er kein direkter Vorläufer unserer Sichtweise. Denn die Klimasystemsichtweise hat sich erst im 20. Jahrhundert entwickelt. Das internationale geophysikalische Jahr (1957/58) stellte das physikalische Klimasystem und dessen Beobachtung in den Vordergrund,[50] die Umsetzung in der Modellierung folgte

---

49 Alexander von Humboldt, *[Tagebücher der Amerikanischen Reise] IX. Varia: Obs. astron. de Mexico a Guanaxuato, Jorullo, Toluca, Veracruz, Cuba, Voy. de la Havane à Philadelphia. Geologie de Guanaxuato, Volcans de Jorullo et de Toluca. Voyage de la Veracruz à la Havane et de la Havane à Philadelphie. Jorullo p. 95–106* URL: http://resolver.staatsbibliothek-berlin.de/SBB0001527C00000000, ohne Ort, 1804/1803, eingesehen Januar 2019.

50 Elena Aronova, Karen S. Baker und Naomi Oreskes, «Big Science and Big Data in Biology: From the International Geophysical Year through the International Biological Program to the Long Term Ecological Research (LTER) Network, 1957–Present», in: *Historical Studies in the Natural Sciences* 40 (2010), S. 183–224.

ab den 1960er Jahren. Aus den Arbeiten von Syukuro Manabe und anderen erwuchs eine neue Klimasystemperspektive, aus der in den 1980er Jahren eine Erdsystemperspektive wurde – ohne expliziten Rückgriff auf Humboldt.

Trotzdem können wir lernen, wie tauglich Humboldts Systemsichtweise ist, um zu einem tieferen Verständnis der Vorgänge zu gelangen. Wir können Humboldt gleichsam über die Schulter schauen und dabei unser eigenes Instrumentarium prüfen. Wir können ihm zuhören, in welcher Klarheit er trotz fehlender Theorie durch Empirie, Empathie und ein immenses Vorstellungsvermögen[51] den Eingriff des Menschen beschreibt. Wie die Veränderung weniger Größen im System sich auf die gesamte Umwelt auswirken können – wenn auch zunächst auf der lokalen und regionalen Skala.

Und was geschah mit den Klimadefinitionen? Humboldts erste der zu Beginn genannten Klimadefinition konnte sich nicht durchsetzen. Mit dem Aufkommen staatlich organisierter Netzwerke[52] (zu deren Entwicklung er maßgeblich beigetragen hatte) orientierte sich die Wissenschaft an einer statistischen Definition von Klima. Der Mensch und sein Empfindungen standen nicht mehr im Zentrum.[53] Julius von Hann definierte Klima in seinem 1883 erstmals erschienenen Handbuch als Langzeitstatistik von Wettervariablen: «Unter Klima verstehen wir die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen.»[54] Diese Definition wurde von der Internationalen Meteorologischen Organisation, der heutigen Weltorganisation für Meteorologie, übernommen. Die Zeitspanne wurde dabei auf 30 Jahre festgesetzt. Diese Definition gilt noch heute.

Auch Humboldts zweite Definition geriet in Vergessenheit. Dass heutige Definitionen des Klimasystems ganz ähnlich lauten,[55] zeigt die Tragfähigkeit seines Klimadenkens, wenn auch nicht das Überdauern seiner Definition.

---

51 Stefan Brönnimann, «Dem Empiriker über die Schulter geschaut. Messen, Sammeln, Ordnen, Darstellen: Humboldts Umgang mit Klimadaten», in: *GeoAgenda* 2 (2019), S. 22–25.

52 Vgl. zum sozialen, politischen und technischen Kontext meteorologischer Messungen: Stefan Brönnimann und Jeannine Wintzer, «Climate data empathy», in: *WIREs Climate Change* 10:2 (2019), e559.

53 Birgit Schneider, *Klimabilder. Eine Genealogie globaler Bildpolitiken von Klima und Klimawandel*, Berlin: Matthes & Seitz 2017.

54 Julius von Hann, *Handbuch der Klimatologie*, Stuttgart: Engelhorn 1883, S. 1.

55 Im *Lexikon der Geographie* URL: https://www.spektrum.de/lexikon/geographie finden wir folgende Definition: «Klimasystem, das Zusammenwirken der Klimaelemente in der Atmosphäre und seine Wechselwirkungen mit den Systemen der Anthroposphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre (Chionosphäre), Pedosphäre und Lithosphäre.»