

Leben ist ihre schönste Erfindung, und der Tod ist ihr Kunstgriff, viel Leben zu haben. [...] Alles ist immer da in ihr. Vergangenheit und Zukunft kennt sie nicht. Gegenwart ist ihr Ewigkeit.

aus: „Die Natur“ (1782/83). Goethe (1749–1832) zugeschrieben, vermutlich aber von dem Schweizer Pfarrer Georg Christoph Tobler (1757–1812).

Liebe Leserin, lieber Leser,

„Nature“, eines der maßgebenden Wissenschaftsjournale, feiert den 150. Geburtstag! Am 4. November 1869 erschien die erste Nummer, herausgegeben von Joseph Norman Lockyer (1836–1920). Ja, der Lockyer, der das Jahr zuvor auf ein neues chemisches Element gestoßen war – und zwar spektroskopisch bei einer Sonnenfinsternis: Helium. Im Heft Nr. 1 kommt Johann Wolfgang von Goethe zu Wort, jedenfalls die Übersetzung eines ihm zugeschriebenen fragmentarischen Essays, betitelt „Die Natur“. Der deutsche Dichterrfürst und Hobbyforscher konnte sich zwar schon 1828 nicht mehr daran erinnern, es geschrieben zu haben, meinte¹ aber, es hätte durchaus seiner Feder entsprungen sein können. Naturforscher, wie Alexander von Humboldt (1769–1859) oder Ernst Haeckel (1834–1919), hielten viel von „Goethes“ Ansichten über die Natur.

2009 verstarb der ehrenwerte John Maddox (geb. 1925). Er war gleich zweimal Herz und Seele des Wochenblattes, von 1966–1973 und 1980–1995. Nicht nur für die Astronomie waren das goldene Zeiten, und man verschlang Sir John's Anmerkungen in der „News and Views“ Rubrik. Sein Wort hatte Gewicht, seine Vorstellung von Wissenschaft war die unsrige: Naturwissenschaftliche Erkenntnis ist mehr als eine beliebige Erzählung unter vielen, wie ein postmoderner Relativismus² glauben machen will.

¹„Daß ich diese Betrachtungen verfaßt, kann ich mich faktisch zwar nicht erinnern, allein sie stimmen mit den Vorstellungen wohl überein, zu denen sich mein Geist damals ausgebildet hatte.“

²Paul Watzlawick (1921–2007), einer der Väter des Konstruktivismus („Wie wirklich ist die Wirklichkeit?“), hatte zu seiner Zeit die Naturwissenschaften noch von der Beliebigkeit kultureller Konstrukte ausgenommen. Er rechnete Physik, Chemie, Biologie ganz selbstverständlich zur **Wirklichkeit erster Ordnung**.

Vor zehn Jahren, am 20. November 2009, kam man dem Urknall etwas näher: Der Large Hadron Collider (LHC) nahm nahe Genf seinen Betrieb (im zweiten Anlauf) auf. Dort prallen Teilchen mit hoher Energie³ (bis 13 TeV) gegenläufig aufeinander, und es werden inzwischen Zustände simuliert, wie sie am Ende der 10^{-11} -ten Sekunde herrschten. Wie dicht dran ist man am Urknall? Nun, in Anbetracht dessen, dass es zwischen der Planck-Zeit ($5 \cdot 10^{-44}$ s) und dem Heute ($14 \cdot 10^9$ a) physikalisch gesehen keine Zäsur gibt, bleibt uns nur, die Angelegenheit logarithmisch⁴ zu betrachten. So gesehen, hat uns der Speicherring experimentell dem Urknall auf der logarithmischen Zeitachse um immerhin 47 % näher gebracht! 53 % „Zeitwüste“ liegen noch im Dunkeln! Da versteckt sich noch jede Menge an spannender Physik!

Der Kohlenstoff ist ins Gerede gekommen, jedenfalls seine Allianz mit Sauerstoff: CO₂. Soeben erschien eine faktenreiche Studie über den irdischen Kohlenstoff, seine Quellen und Senken, und wie sich der Kohlenstoffkreislauf im Laufe der Äonen unter Beteiligung der Biosphäre wandelte. Deshalb geht es diesmal um den Kohlenstoff – aus astronomischer wie irdischer Sicht. Die UNESCO freut's. Sie hat 2019 zum *International Year of the Periodic Table of Chemical Elements* erklärt. Vor 150 Jahren haben der russische Chemiker Dmitri Iwanowitsch Mendelejew (1834–1907) und der Deutsche Julius Lothar Meyer (1830–1895) unabhängig voneinander jene tabellarische Anordnung der chemischen Elemente herausgefunden, die, auf den neuesten Stand gebracht, jeder Schüler kennt. Ordnungsprinzip waren Atomgewicht⁵ und chemisch-physikalische Eigenheiten, wie metallischer bzw. nichtmetallischer Charakter. Die damaligen Lücken im System sind inzwischen gefüllt. Mehr noch, immer schwerere Elemente kommen hinzu! Die Erklärung für das Periodensystem wurde von Wolfgang Pauli (1900–1958), dem Entdecker des Ausschließungsprinzips, Mitte der zwanziger Jahre des vorigen Jahrhunderts nachgereicht. Zuvor musste nämlich erst noch der Spin, d. h. der Eigendrehimpuls des Elektrons, entdeckt werden, etwas, für das die Schulphysik keine Entsprechung kennt.

Zur vollständigen Beschreibung der Elektronenhüllen und damit der chemischen Eigenschaften der Elemente bedarf es einer relativistischen Elektronen-

³13 Tera-Elektronenvolt ($13 \cdot 10^{12}$ eV) heben eine Briefmarke um einen Millimeter an.

⁴Statt sich für *Zeit* zu interessieren, könnte man genauso gut $1/\text{Zeit}$ oder (eine von Null verschiedene) Potenz der Zeit als Maß von Veränderung wählen. Unvoreingenommenheit verlangt nach logarithmischer Darstellung!

⁵Die Kernladungszahl war noch unbekannt!

theorie. Die wurde 1928 von Paul Adrian Dirac (1902–1984) geschaffen. Die Elektronen ordnen sich so in Schalen an, dass ein Atom oder Molekül energetisch möglichst kompakt ist, wobei sich höchstens zwei (im Spin sich unterscheidende) Elektronen im gleichen Orbital aufhalten (Pauli-Prinzip). Die Wechselwirkung der Elektronen mit dem positiv geladenen Kern und untereinander zu berechnen bringt Höchstleistungsrechner allerdings an ihre Grenzen. Auch wenn es Chemiker nicht gerne hören: Chemie ist im Prinzip auf Physik reduzierbar⁶!

Sicherlich haben Sie schon von den einlagigen Kohlenstoffschichten mit Bienwabenstruktur gehört, dem „Wundermaterial“ Graphen? Übereinandergelegt ergibt sich Graphit, zusammengerollt entstehen Nano-Röhrchen. Die Materialdesigner sind begeistert. Werden Kohlenstoff-Sechseringe teilweise durch Fünferinge ersetzt, bilden sich Nano-Kügelchen (z. B. C₆₀), sog. Fullerene. Und alle diese PAH (oder PAK = Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe) kommen im Kosmos vor (und nicht nur in Autoabgasen)!

Kohlenstoff ist immer wieder für eine Überraschung gut. Das meint
Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im November

Am 11. 11., kurz nach 16 Uhr, ereignet sich eine untere Konjunktion. Merkur – auf der Innenbahn und damit auf der Überholspur – zieht aller vier Monate südlich oder nördlich an der Sonnenscheibe vorbei. Überstrahlt von der Sonne ist er dann unsichtbar. Doch diesmal nicht! Diesmal vollzieht sich die untere Konjunktion just, wenn „Neumerkur“ die Bahnebene der Erde, die Ekliptik, kurz zuvor passiert hat. In diesem Falle kommt es zu einem Transit, und man sieht die Silhouette des Planeten vor der hellen Sonnenscheibe. Der Durchgang zieht sich 5 1/2 Stunden hin. Beginn ist 13 Uhr 35 MEZ. Allerdings geht bei uns die Sonne bereits kurz nach der unteren Konjunktion unter. Da Merkur ein kleiner Planet nur ist, erfordert seine Beobachtung ein Gerät. Vorsicht ist angebracht: Das helle Sonnenlicht muss durch einen Dunkelfilter nahezu vollständig entfernt werden! Und dieser Filter sollte sich vor dem Objektiv des Feldstechers/Fernrohrs befinden! Am besten, man wende sich an eine Sternwarte, welche im Rahmen einer öffentlichen Führung die

⁶Das war’s dann allerdings auch. Biologen müssen nichts dergleichen befürchten!

Transitbeobachtung anbietet. Ansonsten ist der flinke Planet am Monatsende für ein paar Tage am Morgenhimmel auszumachen, kurz vor 7 Uhr. Am 28. November erreicht er mit 20° seinen größten westlichen Winkelabstand zur Sonne.

Venus kehrt den Abendstern hervor. Am 24. überholt sie Jupiter. Am 28. November sollte sie tief im SW zusammen mit ihm und der jungen Mondsichel zu sehen sein. Wenige Stunden zuvor wird der Mond den Jupiter am Himmel überholt haben. Die Bedeckung des Jupiter durch den Mond findet am Taghimmel statt und kann mit geeignetem Equipment beobachtet werden. Damit verabschiedet sich Jupiter für eine Weile. Ab Ende Januar 2020 ist wieder mit ihm zu rechnen.

Bereits jetzt zu rechnen ist mit dem Mars. Der taucht am Morgenhimmel auf. Saturn bleibt uns noch am Abendhimmel erhalten – bis Mitte Dezember. Dann wird auch er dem Glanz der Sonne weichen.

Das Leonidenmaximum wird für die frühen Morgenstunden des 18. November erwartet. Man sollte sich dieses Mal nicht zu viel davon versprechen.

Kohlenstoff: kosmisch

Kohlenstoff (C) steht an sechster Stelle im Periodensystem, gefolgt von Stickstoff (N) und Sauerstoff (O). Ein Kohlenstoffatomkern verfügt über sechs Protonen. Seine Kernladungszahl (Ordnungszahl) ist 6. Das Atomgewicht von ^{12}C ist 12, und zwar exakt 12 (was an der Definition der atomaren Masseinheit liegt). Da sowohl das Proton (1,007276) als auch das Neutron (1,008665) schwerer als eine Masseinheit sind, sollten sechs Protonen + sechs Neutronen + sechs Elektronen nach Adam Riese mehr als 12 wiegen. Die Differenz ist die Bindungsenergie. Die wiegt, gemäß $E = m \cdot c^2$, auch etwas und wird bei der Montage eines ^{12}C -Atoms aus den Einzelteilen freigesetzt. Dank Einstein gibt's nur noch einen Erhaltungssatz, den für die (Ruhe-)Energie! Die Masse wird nicht erhalten.

Was die Häufigkeit des Kohlenstoffs im Kosmos anbelangt, so ist er das vierthäufigste Element überhaupt und rangiert gleich nach dem Sauerstoff. (Spitzenreiter sind Wasserstoff und Helium vom Anfang des Periodensystems.) Auf ein Kilogramm (baryonischen) Stoffs entfallen im galaktischen Mittel 10,4 g Sauerstoff und 4,6 g Kohlenstoff. Das Helium entstand wenige Minuten nach dem Urknall, Kohlenstoff und Sauerstoff wurden erst viel später im

Innern von Sternen aus drei bzw. vier Heliumatomkernen (α -Teilchen) thermonuklear zusammengefügt. Die erforderlichen 100 Millionen Grad erreicht die Sonne am Ende ihrer Tage, bevor sie als Planetarischer Nebel farbenprächtig die kosmische Bühne ver- und einen weißen Zwerg hinterlässt. Der besteht aus C und O.

Kohlenstoff kann man sich aus drei α -Teilchen zusammengesetzt denken, Sauerstoff aus vieren. Das Leben bedarf sowohl des Kohlenstoffs – es ist im Reich der organischen Chemie angesiedelt – als auch des Sauerstoffs. Dass beide in vergleichbaren Mengen im Universum vorkommen, grenzt an ein Wunder, wie 1953 dem englischen Astronomen Fred Hoyle (1915–2001) auffiel. Wären die kernphysikalischen Eigenschaften des ^{12}C nur ein klein wenig anders, gäbe es nur Kohlenstoff oder nur Sauerstoff, nicht aber beides! Wer nicht an eine göttliche Fügung glaubt, muss von einer glücklichen sprechen. Wir leben halt in einem Universum, wo – glaubt man Stephen Hawking (1942–2018) – gewisse Kernreaktionsraten zufällig gerade so beschaffen sind, dass sowohl C als auch O in passablen Mengen anfallen: ein Universum, das Leute wie Hoyle hervorzubringen vermag.

Kohlenstoff: irdisch

Zivilisation beruht auf der Duldung durch die Geologie.

William James Durant (1885–1981)

Laut DCO, dem *Deep Carbon Observatory*, enthält die Erde $1,85 \cdot 10^{18}$ Tonnen ($1,85 \cdot 10^9$ Gt) Kohlenstoff, das meiste davon, 99,998 %, tief unter unseren Füßen. Nur 43 500 Gt entfallen auf Böden (Humus etc.), Lufthülle und Meere. Haupt-CO₂-Speicher sind, betrachtet man nur die „Haut“ des Planeten, mit Abstand die Tiefengewässer der Ozeane. Dort lagern allein rund 37 000 Gt.

Unser Planet ist – anders als die Venus – geologisch aktiv. Die Erde verfügt über Plattentektonik. Taucht Ozeanboden in den Mantel ab, entwindet Karbonat, und mit ihm Kohlenstoff, in die Tiefe. Andererseits entgast die Erde über tätige Vulkane und Spalten CO₂ in die Atmosphäre. Dieser Kreislauf sei, so die Forscher, über lange Strecken der Erdgeschichte ausbalanciert gewesen. Gelegentlich kam es zu „Störungen“ durch Einschlag von Asteroiden und Kometen oder aber ausufernden Vulkanismus.

So geschehen vor 252 Millionen Jahren in Sibirien, am Ausgang des Perms: Ausgedehnte Basaltergüsse, die Flutbasalte der Sibirischen Trapps, setzten Unmengen

an Staub (Aerosole) und Gas frei, darunter geschätzte 85 000 Gt CO₂. Erst wurde es kalt, dann heiß und sauer. Wer das „Große Sterben“ überlebte, fand sich im Mesozoikum wieder.

Heutzutage spuckt die Erde jährlich bis zu 0,36 Gt an CO₂ aus, also 0,1 Gt an Kohlenstoff. Durch Verbrennen von Kohle, Öl und Gas, Herstellen von Zement und Stahl sowie Landumnutzung übertrifft der Mensch des Industriezeitalters mit seiner CO₂-Emission diese natürliche geologische Ausdünstung um das 100-fache! Das „Anthropozän“ entsorgt z. Z. etwa 9 Gt Kohlenstoff (33 Gt CO₂) pro Jahr in die Atmosphäre.

Der tiefgreifende geologische Kohlenstoffzyklus⁷, getrieben von der Plattentektonik, wirkt über geologische Zeiträume als Temperaturregler, weil die Silikatverwitterungsrate und damit die CO₂-Fixierung (in Gestalt von Karbonaten am Meeresboden) mit der Temperatur zunimmt.

Durch die Besiedlung des Planeten mit Lebewesen hat die Verwitterung drastisch zugenommen. Leben wirkt zersetzend und setzt dadurch Nährstoffe frei, die ihren Weg in die Ozeane finden und dort Leben ermöglichen. Man ist – im Sinne der Gaia-Hypothese – versucht zu sagen, dass Leben habe sich das Kleid der Erde inzwischen auf seine Bedürfnisse zugeschnitten. Ein Beispiel dafür mag die Resilienz des marinen Ökosystems gegen Versauerung sein. Der biogene⁸ Kalkstein – aus dem Verkehr gezogenes CO₂! – dient als chemischer Puffer, wodurch für eine Weile der Versauerung Paroli geboten wird. Damit das funktioniert, bedarf es biogenen Kalksteins⁹, und zwar in Mengen! In Ermangelung dieses chemischen Puffers waren die Lebewesen des Perm der Azidose noch schutzlos ausgeliefert gewesen.

Keiner Äonen bedarf der Austausch zwischen oberflächennahen Kohlenstoffreservoirs (in Klammern der C-Gehalt in Gt): den Ozeanen (37 900 Gt), der terrestrischen Biosphäre (2000 Gt) und der Atmosphäre (590 Gt vorindustriell). Wie die Zahlen in den Klammern verraten, enthält die luftige Hülle unseres Planeten vergleichsweise wenig Kohlenstoff. Entsprechend empfindlich reagiert sie auf eine Störung bei den Zu- und Abflüssen. Sind die CO₂-Flüsse

⁷Biogeochemiker sprechen vom Karbonat-Silikat-Zyklus. Dieser bedient sich zur chemischen Fixierung von atmosphärischem CO₂ des Kalziumsilikats. Summarisch gilt $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$. Unter Mithilfe von Wasser geht's noch schneller. Die Verwitterung von Calciumkarbonat, CaCO₃, bringt nichts. Sie setzt bloß zuvor gebundenes CO₂ wieder frei.

⁸Photosynthetisch tätiges (Phyto-)Plankton entzieht dem Meerwasser CO₂. Zum Schutz vor Fressfeinden leistet man sich aufwendige Kalkschalen (sehenswert!) aus Kohlenstoff und Kalzium, welche sich *post mortem* als Kalkstein absetzen.

⁹80 % aller Kohlenstoff enthaltenen Sedimente – darunter die Kreidefelsen auf Rügen – gehen auf Kalkablagerungen von meerischen Mikroorganismen zurück.

nicht austariert, wirkt sich das sofort auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre aus.

Die Messstation auf Mauna Loa registriert (seit 1958) sogar s a i s o n a l e Schwankungen der CO₂-Konzentration, weil im Nordsommer die Vegetation mehr CO₂ der Atmosphäre entzieht als im Nordwinter. Der saisonbereinigte CO₂-Gehalt steigt um etwa 0,5 % pro Jahr an. Derzeit enthält die Lufthülle 870 Gt Kohlenstoff.

Die CO₂-Ströme zwischen den oberflächennahen Reservoirs übertreffen die erwähnten 0,1 Gt/a aus den Tiefen der Erde bei weitem. Allein die Photosynthese der grünen Landpflanzen entzieht der Lufthülle jährlich etwa 120 Gt an Kohlenstoff bzw. 440 Gt CO₂. Gäbe es nur diese eine Kohlenstoffs Senke, wäre das CO₂-Problem in $(870 \text{ Gt} - 590 \text{ Gt}) / (120 \text{ Gt/a}) = 2 \frac{1}{3}$ Jahren erledigt – und es würde bitter kalt werden. (Hatten in der Erdgeschichte die Pflanzen das Sagen, wurde es stets kalt!) Kommen wir zu den Kohlenstoff-Quellen: Die gleichen Landpflanzen, die photosynthetisch der Luft CO₂ entziehen, setzen durch Atmung (autotrophe Respiration) etwa 60 Gt davon jährlich frei. Die Böden (Zersetzung von organischem Material) gasen weitere 60 Gt im gleichen Zeitraum aus! Nicht ganz so stark entwickelt ist der CO₂-Handel zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre. Phytoplankton (Algen etc.) will auch leben¹⁰. Oberflächengewässer saugen jährlich ca. 92 Gt Kohlenstoff aus der Luft – darunter auch 2 Gt anthropogenen Kohlenstoffs. (Weitere 3 Gt aus menschlichen Aktivitäten befördern das Pflanzenwachstum durch die zusätzliche CO₂-Düngung.) Von den 9 Gt jährlich, die der Mensch in die Atmosphäre entlässt, „versickert“ etwa die Hälfte. Leider nicht spurlos: Die Ozeane versauern! Der Rest, 4 Gt, verbleibt in der Atmosphäre, was zu dem rasanten Anstieg des CO₂-Spiegels¹¹ führt.

Obwohl der Anteil des Menschen am natürlichen CO₂-Eintrag in die Atmosphäre nur 4 % ausmacht, stört dies nachhaltig das offenbar prekäre Gleichgewicht in den Bilanzen. Das hat sicherlich mit der Plötzlichkeit der Emissionen

¹⁰Das marine Leben nagt am Hungertuch: Eisenmangel! Düngt man mit Eisen, wie seit 1993 in einer Reihe von Feldversuchen geschehen, blühen die behandelten Ozeangebiete buchstäblich auf. Kein Wunder, dass dieses Verfahren auf der Agenda von Plan-B-Geoingenieuren zuoberst steht, geht es darum, der Atmosphäre Kohlenstoff zu entziehen.

¹¹Verglichen mit den vorindustriellen 0,028 Vol.-%, ist der atmosphärische CO₂-Gehalt um fast 50 % angestiegen, auf über 0,041 Vol.-%. Nach Berechnungen des schwedischen Chemikers und Nobelpreisträgers Svante Arrhenius (1859–1927) aus dem Jahre 1896 könnte eine (allmähliche) Verdopplung des CO₂-Gehalt mit einer Erhöhung des Temperaturmittels von vier bis sechs Grad einhergehen. Konkreter sind die Angaben zur K l i m a s e n s i t i v i t ä t durch den IPCC leider auch nicht.

zu tun. Das Erdsystem ist zu träge, als dass es sofort darauf reagieren könnte. Angesichts der thermischen Schwerfälligkeit der Ozeane dürfte es Jahrhunderte, wenn nicht Jahrtausende dauern, bevor das Erdsystem Notiz davon nimmt und sich ein neues Gleichgewicht etabliert. Was wir da eventuell angerichtet haben durch den massenhaften Einsatz fossiler Brennstoffe (Lagerbestand: 8000 Gt), hat uns zwar Wohlstand beschert, könnte sich langfristig (nach menschlichen Zeitmaßen) aber als zivilisationsbedrohend¹² erweisen. Geologisch gesehen, wird sich der Planet vom anthropogenen CO₂-Schock schnell erholen. Der Thermostat, genannt „Kohlenstoffkreislauf“, wird auch diese „Störung“ meistern. Auf Venusverhältnisse, wie von Stephen Hawking befürchtet, wird es nicht gleich hinauslaufen. Venus hat keine (wassergeschmierte) Plattentektonik!

Woher die Zuversicht, was das große Ganze anbelangt? Bisher ging es nach jeder Katastrophe irgendwie weiter. Allerdings mit neuem Personal. Man versetze sich 55,8 Millionen Jahren zurück: Vermutlich durch einen „Methan-Rülpser“ gelangen etliche 1000 Gt Kohlenstoff binnen kürzester Zeit in die Atmosphäre. Methan (CH₄), ein weit effizienteres Treibhausgas als CO₂, legt sich wie ein Pelzmantel um die Erde. Während des Paläozän/Eozän-Temperaturmaximums (PETM) steigen die Temperaturen weltweit um sechs, sieben Grad an, und am Polarkreis aalen sich Krokodile. Nach „nur“ 140 000 Jahren ist der Spuk vorbei. Der Thermostat bewahrte die Schöpfung vor einem galoppierenden Treibhauseffekt, und das Eozän, die „Morgenröte“, konnte endlich beginnen, der Siegeszug der Säugetiere. Für das Studium des Erdsystems sind derartige Zwischenfälle durchaus willkommen: Passierte nichts, lernte man auch nichts!

Der Treibhauseffekt ist ein Segen! Ohne Wasserdampf, dem wichtigsten Treibhausgas, wäre es hienieden um 32 Grad kälter und die Erde eine Eiswüste! Apropos Eiswüste, die Erde war am Ende des Präkambriums mehrfach ins sog. „Schneeballstadium“ geschlittert. Weitestgehende Vereisung! Dem Kältegriff entwinden, konnte sie sich nur dank des Treibhauseffekts.

¹²Das Dilemma: Der Versuch, das Klima zu retten, ist ein Stresstest in Sachen Demokratie. Er birgt (zu viel?) sozialen Sprengstoff!