

Micromégas – Mégamicros: Kosmische Skaleninvarianz und die Suche nach dem richtigen Maß – oder: Eine nicht-euklidische Lektion für das Anthropozän

Oliver Schlaudt 

Abstract The question of the “right measure” or “right size” of all elements of the cosmos, and in particular of man, has received very different answers in modern European literature. Taking Joseph Delbœuf’s article “Mégamicros” as a starting point, this chapter reconstructs (in a somewhat idealized fashion) different historical positions and shows how the question of the right size is linked to the idea of scale invariance (or a lack thereof). A lack of scale invariance challenges the basic abstraction with which we approach our world. Understanding that our basic abstractions can prove delusive, the chapter argues, is the fundamental lesson humanity has to learn at the dawn of the Anthropocene.

Keywords cosmos; scale invariance; planetary boundaries; Anthropocene; Joseph Delbœuf; Michel de Montaigne; Blaise Pascal; Voltaire

Abbildung 1 *Black Marble* – ein aus mehreren Bildebenen zusammengestelltes *composite image*, in welchem eine Arbeitsgruppe der NASA satellitengestützt Informationen über nächtlich sichtbare Lichtquellen auswertet (Román et al. 2018). Mit einer geschliffenen Kugel aus dunklem Turmalin hat bereits Georg Christoph Lichtenberg 1793 die Erde in einem verstörenden Traumfragment verglichen. Darin wird ihm von einem höheren Wesen die Kugel zur Untersuchung überlassen:

„Du liebst die Untersuchung der Natur, sagte er, hier sollst du etwas sehen, daß dir nützlich sein kann. Indem er dies sagte, überreichte er mir eine bläulich grüne und hier und da ins Graue spielende Kugel, die er zwischen dem Zeigefinger und dem Daumen hielt. [...]

Der Geist. So wisse, es war, nach einem verjüngten Maßstabe, nichts Geringeres als – die ganze Erde.

Ich. Die Erde? – Ewiger, großer Gott! und das Weltmeer mit allen seinen Bewohnern, wo sind denn die?

Er. Dort hängen sie in deiner Serviette, die hast du weggewischt.

Ich verstund und schwieg. Aber neun Zehnteile meines noch übrigen Lebens hätte ich darum gegeben, wenn ich meine chemisch zerstörte Erde wieder gehabt hätte.“

Lichtenberg 1968–1974, 3:108–110



„Die Erde eine Turmalin-Verkleinerung.“

G. Chr. Lichtenberg, 1777¹

1 Einleitung

Absicht dieses Beitrages ist es, einen kosmologischen Topos herauszupräparieren, der meines Erachtens für diese Gattung zentral ist, insbesondere auch alle disziplinären Perspektiven miteinander verwebt, aber – vielleicht gerade deswegen und als Folge der Spaltung der „two cultures“ (Snow 1959) – bisher wenig Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat. Der Topos, von dem ich spreche, ist jener der Skaleninvarianz. Skaleninvarianz ist eine im Folgenden noch näher zu bestimmende strukturelle Eigenschaft von Phänomenbereichen, die sich in einer entsprechenden Transformationsinvarianz der sie beschreibenden mathematischen Theorien ausdrückt. Es wird sich zeigen, dass der Topos der Skaleninvarianz eng mit einem zweiten zentralen Thema der Kosmologie verknüpft ist, nämlich der Suche nach dem richtigen Maß. Die Skaleninvarianz, die auf den ersten Blick nur für Spezialisten wie Ingenieure und Physiker von Interesse zu sein scheint und mathematische Laien abschrecken mag, entpuppt sich damit als ein zentrales Thema der kosmologischen Literatur, wenn wir unter dieser Gattung (wie in der Einleitung des Bandes erläutert) all jene Literatur zusammenfassen, die – ungeachtet irgendwelcher disziplinärer, epistemischer oder gattungsmäßiger Einordnungen, insbesondere auch der Trennung von erzählender, spiritueller und wissenschaftlicher Literatur – erstens von der Welt als geordnetem Ganzen handelt und zweitens die Frage nach einem Maßstab oder einer Norm innerhalb dieser Welt aufwirft. Unter dem Weltganzen und dem inhärenten Maßstab können dabei natürlich jeweils sehr unterschiedliche Dinge verstanden werden.

Ich beginne meine disziplinenübergreifende Untersuchung mit einem Gedankenexperiment. Man stelle sich vor, man würde im Schlaf auf die Hälfte seiner Körpergröße reduziert und auf einen Planeten versetzt, der ein exaktes Abbild unserer Erde darstellt, aber ebenfalls im Maßstab 1 zu 2 kleiner ist. Würde man beim Erwachen den Unterschied bemerken?

Diese Frage stellte am 3. Juni 1893 der belgische Philosoph, Mathematiker und Experimentalpsychologe Joseph Delbœuf (1831–1896) vor der Königlichen Akademie der Wissenschaften Belgiens, in deren Hauszeitschrift der Vortragstext noch im selben Jahr auch gedruckt erschien.² Delbœuf war eine etwas schillernde, aber akademisch ernstzunehmende Gestalt des 19. Jahrhunderts. Er interessierte sich für Hypnose ebenso

1 Lichtenberg 1968–1974, I:524.

2 Delbœuf 1893. Ein weiterer Abdruck erfolgte in der belgischen Zeitschrift *Ciel et Terre*.

wie für nicht-euklidische Geometrie, publizierte über algorithmische Logik wie über die Psychologie der Eidechsen. Er malte in seinem Artikel das uns interessierende Gedankenexperiment in lebhaften Farben aus.³ Den Protagonisten der phantastischen Reise auf die verkleinerte Zwillingerde nannte er Mégamicros. Delbœufs Behauptung lautete, dass Mégamicros durchaus des Unterschieds gewahr würde – und zwar entgegen den Vorhersagen der Newton'schen Physik in der Lesart des Mathematikers Laplace, nach welchen – und damit nähern wir uns bereits dem Thema der Skaleninvarianz – Systeme aller Größenordnungen identisches dynamisches Verhalten zeigen sollten.

Die Argumente von Delbœuf stießen bei den Wissenschaftlern der Zeit zwar nicht auf Zustimmung, wurden aber durchaus zur Kenntnis genommen und lebhaft diskutiert. Ein Auszug aus dem Originalartikel erschien noch 1893 in englischer Übersetzung in der renommierten amerikanischen Zeitschrift *Nature* – wo sie alsbald die Widerrede des amerikanischen Physikers und Ingenieurs Samuel Tolver Preston provozierte (Preston 1893).⁴ Delbœuf wiederholte im Folgejahr seine Überlegung in englischer Sprache auf den Seiten der Zeitschrift *The Monist* (Delbœuf 1894a). Eine vollständigere Übersetzung der Arbeit folgte 1898 im amerikanischen *Popular Science Monthly*. In Frankreich publizierte der Ingenieur Georges Lechalas (1851–1919) eine kritische Antwort (Lechalas 1894), der Philosoph Louis Couturat mischte sich in die Debatte ein (Couturat 1896), und auch der Ingenieur Auguste Calinon (1850–1900), der für seine Descartes-Edition bekannte Wissenschaftshistoriker Paul Tannery (1843–1904) sowie sogar Franz von Brentano griffen mit persönlichen Schreiben in die Debatte ein, wie Delbœuf nicht ohne Stolz erwähnt (Delbœuf 1894b). Die – wenn auch inhaltlich fehlerhafte – Erwähnung bei dem großen Mathematiker und Philosophen Henri Poincaré (1906) erlebte Delbœuf indes nicht mehr.

Im Folgenden werde ich durchaus auf den Gegenstand der Diskussion zwischen Delbœuf und seinen Kritikern eingehen. Zuvor möchte ich allerdings eine Serie miteinander verketteter literarischer Anspielungen und Bezugnahmen offenlegen, die hinter Delbœufs Text stehen. Auf diese Weise wird der Rahmen sichtbar, in welchem der im Grunde spezialwissenschaftliche Gegenstand der Debatte eine Bedeutung erhält, die über die Geometriediskussionen des 19. Jahrhunderts hinausgeht.

- 3 Für mehr Informationen über die Person siehe Gilkinet 1905 und Ruyckaerts 1993, eine Bibliographie seiner Schriften mit Links zu Digitalisaten findet sich auf der Internetseite <https://sites.google.com/site/josephdelbœuf18311896/oeuvre-works>. Torretti 1978 und Panza 1995 bieten eine Einordnung in die zeitgenössischen philosophischen Diskussionen über Geometrie. Torretti betont (1978, 153): „Delbœuf was probably the earliest philosopher who had first-hand acquaintance with the works of Lobachevsky.“ Der russische Mathematiker Lobačevskij (1792–1854) war einer der Begründer der nicht-euklidischen Geometrie um 1830. Kenntnis seiner Schriften war 1860, als Delbœuf über Geometrie schrieb, in der Tat außergewöhnlich.
- 4 Für das deutschsprachige Publikum veröffentlichte Max Dessoir ein kurzes Referat in der *Zeitschrift für Hypnotismus, Suggestionstherapie, Suggestionstheorie und verwandte psychologische Forschungen* (Dessoir 1893/94, 243).

2 Von Delbœuf zu Montaigne und zurück

Das erste Glied in der Kette literarischer Verweise bedarf kaum eines detektivischen Spürsinns, so offenkundig ist es. Der Titel der Delbœuf'schen Abhandlung, „Mégamicros“, spielt direkt auf die Erzählung „Micromégas“ von Voltaire (1694-1778) aus dem Jahr 1752 an.⁵ In dieser Erzählung lässt Voltaire den Bewohner eines gigantischen Planeten, der um den Stern Sirius kreist, durch das Universum reisen und schließlich auch die Erde besuchen. Er trifft auf unserem Heimatstern am 5. Juli 1737 ein, also just an jenem Tag, an welchem die von Maupertuis im Auftrag der Pariser Akademie der Wissenschaften angeführte Expedition zur Vermessung des Erdmeridians auf ihrer Rückreise von Lappland nach Frankreich vor der skandinavischen Küste in Seenot geriet (Voltaire 1979, 695, siehe **Abb. 2 und 3**). Micromégas' Ankunft entpuppt sich als die wahre Ursache der unruhigen See, welche die Expedition an jenem Tag in Gefahr brachte. In diesem Zwischenfall verknüpfen sich zwei gegensätzliche Momente: der Triumph der modernen Physik einerseits, denn die Expedition konnte die von Newton postulierte rotationsbedingte Abplattung der Erde an den Polen erfolgreich nachweisen, und die Prekarität des menschlichen Daseins andererseits, welches sich ungeachtet seines geistigen Triumphs, durch ein paar hölzerne Planken nur unzureichend geschützt, weiterhin dem Unbill der Natur ausgesetzt sah. Hinter diesen beiden Momenten stehen ein erkenntnistheoretisches und ein satirisches Motiv der Erzählung. Letzteres ist offenkundig: Fiktionale Reisen dienten oft zur satirischen Distanzierung von der eigenen Gegenwart, und die Reise in den Weltraum, vorzüglich gen Mond und Sonne, wie man sie vor Voltaire bereits von Cyrano de Bergerac (1657, 1662) und Daniel Defoe (1705) kennt, treibt diese Literatur auf die Spitze. Voltaire potenziert dieses Motiv durch die Kombination mit einem weiteren Mittel der satirischen Entfremdung, nämlich dem Spiel mit der Größe, wie es aus den komplementären Liliput- und Brobdingnag-Episoden aus Jonathan Swifts *Gulliver's Travels* (1726) bekannt ist.

An dieser Stelle kommt das zweite, erkenntnistheoretische Motiv ins Spiel. Die Fiktionen spielen mit dem Größenvergleich. Alles, was wir von den Größen der Dinge wissen können, beruht auf Vergleich, insbesondere dem Vergleich mit dem Maßstab, worin die Messung als quantitative Größenbestimmung besteht (siehe Schlaudt 2020). Wenn man die Größe und zugleich den Maßstab im selben Verhältnis vergrößert oder verkleinert, dann muss dieser Unterschied offenbar unbemerkbar bleiben (weil ja nur das Verhältnis bestimmt werden kann, welches aber per Konstruktion konstant bleibt). Gottfried Wilhelm Leibniz hat diese Überlegung in einem kosmischen

5 Eine deutsche Übersetzung erschien im selben Jahr. Ich beziehe mich im Folgenden auf die Ausgabe *Romans et contes* von Frédéric Deloffre, Jacqueline Hellegouarc'h und Jacques van den Heuvel (Voltaire 1979), deren hilfreichem Textkommentar ich viele Informationen entnommen habe.



Abbildung 2 Micromégas entlässt aus seiner Hand das Schiff der Maupertuis'schen Expedition. Illustration zu Voltaires Erzählung von Charles Monnier, 1778.



Abbildung 3 Pierre Louis Moreau de Maupertuis. Kupferstich von J. Daullé aus dem Jahr 1741 nach einem Gemälde von R. Levrac-Tournière (1737). Im Bildhintergrund, in Maupertuis' Kleidung sowie dem im unteren Bildrand dargestellten Fresko (oder Relief?) finden sich etliche Verweise auf die Expedition nach Lappland. Der in Newtons Theorie implizierten Abplattung des Erdballs an den Polen scheint Maupertuis freilich durch sanften Druck auf den Globus nachhelfen zu wollen.

Gedankenexperiment verdichtet: Wenn Gott das gesamte Universum in allen seinen Teilen im selben Verhältnis vergrößert oder verkleinert, kann dies prinzipiell nicht festgestellt werden.⁶ Wie sieht nun die Welt des Voltaire'schen *Micromégas* aus? Einerseits zeigen die Bewohner von Sirius augenfällige Unterschiede, die mit der körperlichen Größe von 120.000 *pieds de roi* (oder knapp vierzig Kilometern) korrelieren: Lebensalter, Zahl der Sinne usw. sind entsprechend gesteigert. Das dramatische Moment der Erzählung besteht freilich in der ‚Entdeckung‘ des auf der Erde gelandeten *Micromégas*, dass auch die aller kleinsten Lebewesen, die sich dem Blick des Riesen anfänglich entzogen – nämlich die Menschen, die sich hinsichtlich ihrer Größe zu ihm verhalten wie etwa eine kleine Milbe von etwa einem Zehntel Millimeter zu uns –, über alle Zeichen der Zivilisation verfügen, wie zum Beispiel Vernunft ... und Ärger mit dem anderen Geschlecht. Hier taucht unmittelbar der Topos der Skaleninvarianz auf: Gewisse Phänomene sind nicht abhängig von der Größenordnung des Systems, sondern zeigen sich universell. Aber auch die offensichtlichen Unterschiede stellen sich nicht willkürlich ein, sondern stehen in Proportion zur Körpergröße, so dass zumindest die Verhältnisse ebenfalls Invarianten sind.⁷ Insofern die Zahlen aber just Verhältnisse anzeigen, steht mit der Mathematik auch eine Universalsprache zur Verfügung, die das Universum größeninvariant beschreiben kann. Die Anspielung auf die Bestätigung von Newtons Theorie (als Universaltheorie) durch Maupertuis' Expedition, welche die Abplattung der Erde an den Polen nachwies, ist also kein Zufall (und wird via Laplace auch den Stein des Anstoßes für Delbœuf darstellen).

Von *Micromégas* kommen wir zum zweiten Glied in der Kette literarischer Verweise, denn die Erzählung Voltaires ist ihrerseits als Antwort auf den französischen Philosophen Blaise Pascal (1623–1662) zu lesen, insbesondere sein Fragment „Disproportion de l'homme“. Dieser längste und von Pascal am weitesten ausgearbeitete Text seiner *Pensées* handelt unter dem Titel „Disproportion“ vom Fehlen jeglichen Verhältnisses zwischen Mensch und Universum, welches er in dramatischen Worten beschreibt. Unsere Welt weist zu beiden Seiten – im unendlich Großen wie im unendlich Kleinen – zwei „Abgründe“ (*abîmes*) auf, zwischen denen der Mensch steht, ohne sich zu ihnen in ein Verhältnis setzen zu können. Mangels eines gemeinsamen Verhältnisses von Mensch und Welt muss insbesondere die Welt als Ganze unerkennbar bleiben, womit die (epistemische) Beschränktheit des Menschen angesprochen ist (im Manuskript lautete der ursprüngliche Titel auch „Incapacité de l'homme“):

- 6 Leibniz 1971, 266, 276: „si Deus universum orbem cum omnibus partibus proportione eadem servata redderet majorem, nullum esset principium id notandi.“ Vgl. auch Risi 2007, 357–358.
- 7 In diesem Sinne hat auch Alexander von Humboldt in seinem *Kosmos* die Skaleninvarianz hervorgehoben, und zwar just an der neuralgischen Stelle des Übergangs vom „siderischen“ zum „tellurischen“ Teil des Naturgemäldes: „Die Verschiedenheit des Maaßes dieser Einwirkungen darf den Physiker nicht davon abhalten, in einem Naturgemälde an den Zusammenhang und das Walten gemeinsamer, gleichartiger Kräfte zu erinnern“ (Humboldt 1845, 162).

Da sie es versäumt hatten, diese Unendlichkeiten gründlich zu bedenken, machten sich die Menschen mit Kühnheit auf die Suche nach der Natur, als ob sie zu dieser in irgendeinem Verhältnis stünden. [...] Wir sollten um unsere Reichweite wissen!⁸

Wir brennen vor Verlangen, eine feste Unterlage und eine letzte, beständige Basis zu finden, um darauf einen Turm zu errichten, der sich in das Unendliche erhebt, aber unser gesamtes Fundament birst, und die Erde tut sich bis in die tiefsten Tiefen auf.⁹

Man erkennt nun leicht den eigentlichen Witz der Voltaire'schen Erzählung: Der große Erfolg von Newtons Physik wird direkt als Antwort auf die pessimistische Haltung Pascals positioniert. Pascals Pessimismus ist praktisch widerlegt. Die Erzählung entpuppt sich mithin als eine Art Parabel der Aufklärung.

In der Kette von Anspielungen können wir allerdings noch ein Glied weitergehen, womit der diskursive Rahmen noch eine weitere Dimension gewinnt. Das Fragment Pascals ist nämlich – wie bei diesem Autor üblich – gespickt mit Bezugnahmen auf die *Essais* des Renaissancephilosophen Michel de Montaigne (1533–1592), womit wir noch einmal um ein Jahrhundert weiter in die Vergangenheit verwiesen werden.¹⁰ Der pessimistische Pascal schien sich dabei durchaus mit dem Philosophen der französischen Renaissance einig zu glauben. In der Tat finden wir auch bei Montaigne eine skeptische Grundhaltung, die derjenigen Pascals zumindest in oberflächlicher Betrachtung ähnlich sieht. Gleichwohl kann man sich fragen, ob sich Pascal nicht über die geistige Verwandtschaft zu Montaigne täuscht. Denn der Skeptizismus hat bei beiden letztendlich ein entgegengesetztes Vorzeichen: Montaigne akzeptiert das Diesseits als mögliche Heimat des Menschen, Pascal nicht. Montaigne erinnert uns zwar an die Endlichkeit des Lebens und die Vergeblichkeit des menschlichen Strebens, ruft uns aber dazu auf, uns mit diesen Bedingungen des menschlichen Daseins zu versöhnen und so in der Welt unsere Heimat zu finden (ganz deutlich etwa in dem Text „Philosophieren heißt sterben lernen“ [*Que philosopher c'est apprendre à mourir*]). Für Pascal hingegen kann es diese Versöhnung nicht geben, denn zwischen den beiden Unendlichkeiten gibt es ein für alle Mal keine richtige Mitte.

8 Pascal 2000, 610–611: „Manque d'avoir contemplé ces infinis, les hommes se sont portés témérairement à la recherche de la nature comme s'ils avaient quelque proportion avec elle. [...] Connaissans donc notre portée.“ [Deutsche Übersetzung durch den Verf.]

9 Pascal 2000, 612: „Nous brûlons du désir de trouver une assiette ferme, et une dernière base constante pour y édifier une tour qui s'élève à [l']infini, mais tout notre fondement craque et la terre s'ouvre jusqu'aux abîmes.“ [Deutsche Übersetzung durch den Verf.]

10 Diese Anspielungen Pascals sind im kritischen Apparat der Ausgabe von Michel Le Guern, auf die ich mich hier dankbar beziehe, sorgfältig entschlüsselt.

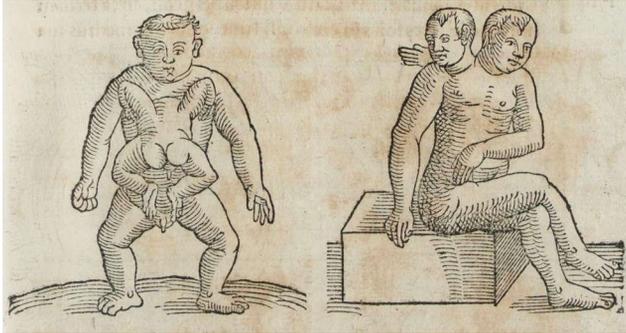


Abbildung 4 Illustration aus Conrad Lycosthenes' *Prodigiorum ac ostentorum chronicon* von 1557 (519). Die Missbildung in der linken Bildhälfte entspricht dem Fall, den Montaigne bei einem Kind beschreibt. Lycosthenes stellt solche Missgestalten in eine Reihe mit anderen ungewöhnlichen Naturerscheinungen und sieht sie wie Katastrophen und Kometen als Vorzeichen eines baldigen Eingreifen Gottes. Montaigne hingegen verstand ein solches *enfant monstrueux* weder als Vorzeichen noch auch nur als wundervolle oder fehlerhafte Abweichung von der vorgesehenen Ordnung, sondern – im Sinne der Renaissancekosmologie – als Realisation einer Möglichkeit, als weitere Spielart in einer Welt, die als Fülle disparater Elemente verstanden wurde. Das Wesen ist da und füllt damit eine Lücke, die ansonsten leer geblieben wäre.

Es gibt einen Essay Montaignes, der diesen Unterschied gut zum Ausdruck bringt, zugleich aber auch die kosmologische Dimension, an welcher wir hier ja interessiert sind, deutlich werden lässt. Ich meine den anrührenden Text über die „Mißgeburten“ (*D'un enfant monstrueux*), in welchem Montaigne die präzise Schilderung zweier missgestalteter Personen bietet (siehe **Abb. 4**), um endlich zu folgendem Schluss zu kommen:

Was wir Mißgeburten nennen, sind für Gott keine, da er in der Unermeßlichkeit seiner Schöpfung [*immensité de son ouvrage*] all die zahllosen Formen [*l'infinité des formes*] sieht, die er darin aufgenommen hat. ... Gott läßt in seiner grenzenlosen Weisheit nichts entstehen, was nicht gut, wohlgeordnet und allgemeingültig wäre [*rien que de bon et commun et réglé*] – wir können nur die inneren Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten [*l'assortiment et la relation*] nicht erkennen.¹¹

11 Montaigne 1998, 352–353. „Ce que nous appellons monstres ne le sont pas à Dieu, qui voit en l'immensité de son ouvrage l'infinité des formes qu'il y a comprises [...]. De sa sagesse il ne part rien que de bon et commun et réglé; mais nous n'en voyons pas l'assortiment et la relation“ (Montaigne 1962, 691).

Wir finden in diesem Zitat durchaus die beiden definierenden Merkmale der kosmologischen Gattung wieder, und zwar in der für die Renaissance typischen Form der *great chain of being* oder *scala naturae* (**Abb. 5**):¹² erstens nämlich die Rede von der Welt als strukturiertem Ganzen – hier angesprochen als Ganzes der göttlichen Schöpfung, die in einem gesetzmäßigen Zusammenhang einer Unendlichkeit verschiedener Formen besteht –; und zweitens die Frage nach dem rechten Maß, hier als dem „wohlgeordneten“ und damit dem richtigen Platz eines jeden Geschöpfes innerhalb dieser Ordnung. Anders als Pascal glaubt Montaigne an eine solche Ordnung, seine Skepsis bezieht sich nur auf die Möglichkeit ihrer Erkenntnis durch den Menschen. Und so gilt auch von der vermeintlichen „Mißgeburt“ (*monstre*), dass sie mitnichten einen Fehler oder Makel der Welt darstellt, sondern einfach eine notwendige Stelle in der lückenlosen Fülle ihrer Formen einnimmt.

Wenn wir nun die Glieder in der historischen Reihenfolge von Montaigne zu Voltaire abgehen, können wir als vorläufiges Ergebnis dieser motivischen Spurensuche dies festhalten: In der Kosmologie Montaignes gibt es die ‚richtige‘ Größe, verstanden als Stelle in der lückenlosen Fülle der variierenden Formen, auch wenn wir sie nicht unbedingt erkennen können. Bei Pascal hört die richtige Größe auf zu sein. Pascal beerbt noch die Vorstellung einer *scala naturae*, aber setzt sie zu beiden Seiten, dem Kleinen wie dem Großen, ins Unendliche fort, womit keine Stelle mehr ein benennbares Verhältnis zum Ganzen hat. Das rechte Maß wird hier ontologisch ausgeräumt (*disproportion*), unsere epistemische Beschränktheit (*incapacité*) ist bloß eine Konsequenz davon. Voltaire nimmt wiederum eine Gegenposition ein, aber wohlgemerkt ohne wieder bei Montaignes Standpunkt anzukommen. Für Voltaire ist jede Größe richtig, und damit ist insbesondere auch die Erkennbarkeit der Welt verbürgt, die sich für ihn mit der klassischen Physik auch einlöst. Bei Voltaire stellt die Skaleninvarianz mithin eine Allegorie der Aufklärung dar, nämlich der Überwindung des Vorurteils, dass eine bestimmte Größenordnung ausgezeichnet sein könnte. Es gibt im Kosmos keinen Maßstab, aber durchaus universelle Gesetze – und diese können auch erkannt und mathematisch beschrieben werden. (Voltaires Haltung sollte dabei nicht vorschnell für das 18. Jahrhundert verallgemeinert werden, wie die in der Bildunterschrift zu **Abb. 1** beschriebene Traumerzählung Lichtenbergs von 1793 zeigt, die ebenfalls mit dem Phänomen der Skalierung spielt, aber die Schwierigkeiten dieses Erkenntniswerkzeugs hervorhebt und damit eine deutlich skeptischere Grundhaltung ausdrückt.¹³)

12 Lovejoy 1936, 61, Foucault [1966] 2015, 1063–1064.

13 „Ein Traum“, in Lichtenberg 1968–1974, 3:108–III.

3 Die Frage der „ähnlichen Welten“

Just der Erfolg der Newton'schen Theorie wurde nun Delbœuf zum Stein des Anstoßes. Laplace hatte die Skaleninvarianz des Newton'schen Gravitationsgesetzes bereits 1795 unterstrichen:

Eine bemerkenswerte Eigenschaft dieses Naturgesetzes besteht darin, dass, wenn die Dimensionen aller Körper im Universum, ihre wechselseitigen Abstände und ihre Geschwindigkeiten im selben Verhältnis zu- oder abnehmen, diese Körper Bahnen beschreiben würden, die denen, die sie wirklich beschreiben, vollkommen ähnlich wären, und sie genau dasselbe Erscheinungsbild abgeben würden [...]. Auf diese Weise sind die Bewegungsercheinungen des Universums unabhängig von seiner absoluten Größe.

Wie Laplace betont, ergibt sich diese Eigenschaft als eine direkte Konsequenz aus der speziellen mathematischen Form dieses Gesetzes:

denn die sie antreibenden Kräfte würden im selben Verhältnis wie die Dimensionen des neuen Universums zu- oder abnehmen, *da sich die Kräfte aus den durch das Quadrat der Abstände dividierten Massen ergeben*.¹⁴

Damit hat die Behauptung der Skaleninvarianz einen anderen Status erhalten, als sie noch bei Leibniz hatte. Dieser hatte die Invarianzeigenschaft direkt aus der Relativität der Größe gefolgert und glaubte folglich, einen apriorischen Beweis liefern zu können, der unabhängig von der konkreten Gestalt des Universums gilt. Laplace unterscheidet – wie die heutige Modelltheorie der Ingenieure – der Sache nach zwischen geometrischer und dynamischer Ähnlichkeit, und die Frage, ob geometrisch ähnliche Systeme (das heißt in ihrer Größe veränderte Systeme) sich auch dynamisch ähnlich verhalten (das heißt im vorliegenden Fall in geometrisch gleichen Bahnkurven resultieren), muss abhängig von dem jeweils geltenden dynamischen Gesetz beantwortet werden. Laplace geht noch einen kleinen Schritt darüber hinaus, wenn er ergänzt, dass die Gestalt des Universums so wenig von seiner absoluten Größe wie von der

14 Laplace 1795, 193: „Une propriété remarquable de cette loi de la nature, est que si les dimensions de tous les corps de cet univers, leurs distances mutuelles et leurs vitesses, venaient à augmenter ou à diminuer proportionnellement; ils décriraient des courbes entièrement semblables à celles qu'ils décrivent, et leurs apparences seraient entièrement les mêmes; car les forces qui les animent, étant le résultat d'attractions proportionnelles aux masses divisées par le carré des distances, elles augmenteraient ou diminueraient proportionnellement aux dimensions du nouvel univers. [...] Ainsi, les apparences des mouvemens de l'univers sont indépendantes de ses dimensions absolues [...]“

absoluten Größe der Bewegungen abhängen, da letztere – wie bereits von Newton hervorgehoben – ja auch gar nicht erkannt werden können. Aber ob ein solches *a priori*-Argument auch für die absolute Größe gemacht werden kann, lässt er offen.

Delbœuf greift Laplace' Argumentation in seinem Gedankenexperiment direkt an. Da alle Längen proportional verkleinert wurden, so räumt er Laplace gegenüber ein, kann Mégamicros natürlich dem bloßen Augenschein nach keinen Unterschied feststellen und wird beim Erwachen seine Verwandlung und seinen Transport in eine Modellwelt nicht bemerken. Dies ändert sich aber, wie Delbœuf scharfsinnig feststellt, sobald Mégamicros einen vertrauten Gegenstand nicht mehr nur betrachtet, sondern auch in die Hand nimmt. Warum? Das Volumen der Gegenstände und somit ihre Masse hat sich bei Halbierung aller Längen auf ein Achtel ($2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$) des Originals reduziert. Gleiches gilt zwar auch für Mégamicros' Körperkraft, dessen Muskelvolumen ebenfalls auf ein Achtel geschrumpft ist. Hebt Mégamicros nun den Gegenstand an, so findet er ihn gleichwohl erstaunlich leicht, denn sein Gewicht hat sich nicht nur mit seinem Volumen auf ein Achtel reduziert, sondern aufgrund der ebenfalls halbierten Erdanziehung auf ein Sechzehntel! (Aufgrund des halbierten Erdradius befinden sich die Körper zwar zweimal näher am Gravitationszentrum der Erde und werden daher vierfach stärker angezogen, zugleich aber ist die anziehende Masse der Erde auf ein Achtel reduziert, was effektiv in einer Halbierung der Anziehung resultiert.) Die Bewohner der kleineren Erde kämen also mit einem wesentlich zierlicheren Körperbau aus. Original- und Modellwelt sind folglich durchaus empirisch unterscheidbar, was Delbœuf noch an einer ganzen Reihe weiterer Beispiele zeigt.

Wie ich bereits eingangs beschrieben habe, wurde der Artikel Delbœufs recht lebhaft rezipiert. Das Interesse an der von ihm aufgeworfenen Frage hing zu dieser Zeit insbesondere mit der größeren Diskussion zusammen, welche die Entdeckung nichteuklidischer Geometrien ausgelöst hatte (das heißt präziser die Entdeckung, dass sich Geometrien, die das euklidische Parallelenpostulat verletzen, logisch widerspruchsfrei formulieren lassen). Mit dem Auftauchen solcher Geometrien wurde ausgerechnet derjenige Bestand menschlichen Wissens, der seit seiner frühen axiomatischen Formulierung bei Euklid bisher als am gesichertsten gelten konnte, plötzlich zur Disposition gestellt. Weder war mehr klar, ob die euklidische Geometrie wirklich gilt, noch was „Geltung“ in diesem Zusammenhang überhaupt bedeutet – ist es eine empirische Frage, welche Geometrie die richtige ist, und ist die Geometrie mithin eine Experimentalwissenschaft? Für uns von besonderem Interesse ist dabei, dass sich – wie Delbœuf selbst 1860 als einer der ersten klar herausstellte – nichteuklidische Geometrien gerade durch die fehlende Skaleninvarianz unterscheiden. Man kann sich dies am Beispiel der Winkelsumme des Dreiecks leicht vor Augen führen. In der euklidischen Geometrie stellt diese eine Invariante dar und beträgt immer zwei rechte Winkel. In einer sphärischen Geometrie, also auf einer Kugeloberfläche wie zum Beispiel näherungsweise der Erdoberfläche, hängt dies von der Größe ab. Für

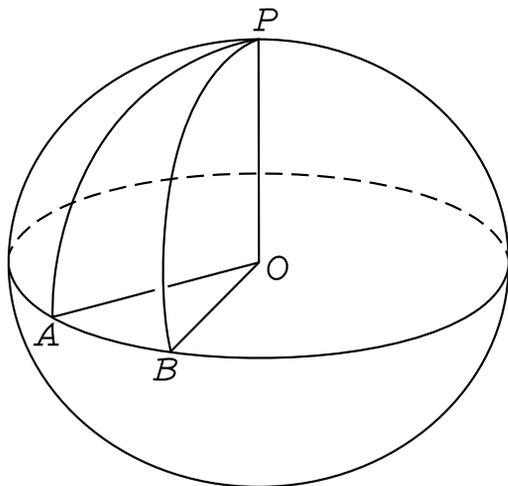


Abbildung 6 Geometrische Figuren sind nur im flachen euklidischen Raum selbst-ähnlich. Auf der Kugeloberfläche hängen die Eigenschaften eines Dreiecks von seiner absoluten Größe (im Verhältnis zum Kugelradius) ab. Form und Größe lassen sich hier nicht streng voneinander trennen.

kleine Dreiecke gilt ungefähr der euklidische Lehrsatz, für große nicht. Man stelle sich ein Dreieck mit einem Abschnitt des Äquators als Basis und dem Nordpol als Spitze vor (**Abb. 6**). Die Seiten stehen offenbar beide senkrecht auf dem Äquator, aber der Winkel am Pol ist gleichwohl von Null verschieden und kann sogar verschiedene Werte annehmen, je nachdem, wie weit die beiden Ecken auf dem Äquator voneinander entfernt sind. Die Winkelsumme ist hier also größer als zwei rechte und zudem keine Invariante. Ein Widerspruch zur Relativität der Größe, auf die Leibnizens Argument beruht, besteht übrigens nicht. Die Eigenschaften der Formen hängen nämlich nicht von ihrer ‚absoluten‘ Größe ab, sondern von ihrer Größe relativ zum Radius der Kugel (im gewählten Beispiel der Erdoberfläche). Das Besondere dieser Geometrie besteht mithin darin, dass sie, anders als die euklidische Geometrie, einen inhärenten charakteristischen Größenparameter enthält (die „Krümmung“ als das Inverse des Kugelradius). Dies hat erstaunliche Konsequenzen für unsere Begriffsbildungen. Dass in der nichteuklidischen Geometrie die Eigenschaften der Formen von ihrer Größe abhängen, heißt nichts anderes, als dass Form und Größe im Allgemeinen nicht so strikt getrennt werden können, wie wir dies aus der euklidischen Geometrie gewohnt sind!¹⁵ Es zeigt sich hier bereits, dass mangelnde Skaleninvarianz fundamentale Denkgewohnheiten infrage stellt.

15 Delbœuf prägt hierfür die beiden Begriffe der Homogenität und der Isogenität (vgl. dazu Couturat 1898, 373). Homogenität ist für Delbœuf die Unabhängigkeit von Form und (absoluter) Größe, d. h. die Möglichkeit der Realisierung ähnlicher Figuren, sprich derselben Form in verschiedener Größe. Davon unterscheidet er die Isogenität als die Unabhängigkeit von Form und Größe geometrischer Figuren vom Ort im Raum, was sonst als Homogenität bezeichnet wird und mit der deformationsfreien Beweglichkeit von Körpern zusammenfällt, die von Helmholtz (Helmholtz [1866] 1883, 615) als Kennzeichen von Geometrien konstanter Krümmung ausgemacht wurde.

Vor diesem Hintergrund wird das allgemeine philosophische Interesse an Delbœufs Gedankenexperiment deutlich. Die in der Rezeption geltend gemachten Einwände gegen die Argumentation von Delbœuf betrafen sämtlich die Frage, was es überhaupt heißt, die Größe eines Systems zu variieren. Der französische Ingenieur Georges Lechalas brachte dies auf den Punkt:

Herr Delbœuf unterstellt, dass die vergrößerten oder verkleinerten Körper aus denselben Bestandteilen bestehen wie diejenigen unserer Welt, so dass ihre Anzahl entsprechend zu- oder abnimmt. Nun liegt es aber auf der Hand, dass man auf diese Weise keine Welt erhält, die mit unserer in allem außer der Größenordnung übereinstimmt; wenn wir eine solche Identitätshypothese aufstellen, dann beziehen wir sie genauso auf die Moleküle, aus denen sich die Körper zusammensetzen, wie auf die allgemeine äußere Gestalt dieser Körper, und, um diese Überlegung verständlicher zu machen, sagen wir, dass das Ergebnis der Vergrößerung einer Kiste voller Bleikörner mitnichten ein Kasten voll derselben Körner in größerer Anzahl ist, sondern ein Kasten mit der gleichen Zahl von Bleikugeln.¹⁶

Lechalas unterscheidet hier zwei Fälle (welche die Literatur der kommenden Jahrzehnte weiter beschäftigen werden), nämlich einerseits die Konstruktion eines Modells (zum Beispiel des Planeten mitsamt seinen Bewohnern) sozusagen innerhalb unseres Universums und mit der uns zur Verfügung stehenden Materie und andererseits die Skalierung des gesamten Universums selbst mitsamt seinen Grundbausteinen. Lechalas spricht im ersten Fall von der Frage „ähnlicher Objekte“, in letzterem Fall von der Frage „ähnlicher Welten“ (1896, 109).¹⁷ In letzterer Bedeutung, welcher vermutlich

16 Lechalas 1896, 106: „M. Delbœuf pose en principe ... que les corps majorés ou minorés sont composés d'éléments identiques à ceux qui composent notre monde, en sorte que leur nombre est augmenté ou diminué. Or, il est absolument évident qu'on n'obtient pas ainsi un monde identique au nôtre, à l'échelle près; quand nous posons l'hypothèse de cette identité, nous l'appliquons aux molécules qui composent les corps aussi bien qu'à l'enveloppe générale de ces corps, et, pour rendre notre pensée plus sensible, nous dirons que le résultat de la majoration d'une boîte pleine de grains de plomb n'est point une caisse également pleine de simples grains en plus grand nombre, mais une caisse pleine d'un égal nombre de balles.“ Siehe dazu auch Feynman 1963, Kap. 52-2: „Today, of course, we understand the fact that phenomena depend on the scale on the grounds that matter is atomic in nature, and certainly if we built an apparatus that was so small there were only five atoms in it, it would clearly be something we could not scale up and down arbitrarily. The scale of an individual atom is not at all arbitrary—it is quite definite.“

17 Formal unterscheiden sich beide Szenarien im Verhalten der Naturkonstanten, welche sozusagen die Bausteine des Universums charakterisieren: In der Modellkonstruktion behalten sie ihre Werte im Gegensatz zu den übrigen Größen, in der Skalierung des Universums verändern sie sich mit den anderen Größen.

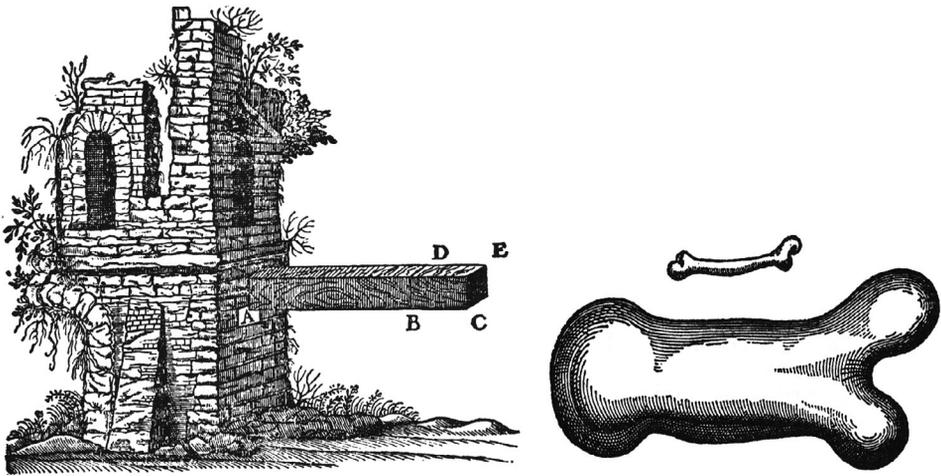


Abbildung 7 Im Allgemeinen sind Systeme nicht selbständig: Bauten und Maschinen sind nicht in jeder Größe stabil, und die Knochen größerer Tiere müssen unverhältnismäßig kräftiger sein.

auch dem Leibniz'schen Gedankenexperiment entspricht, ist die Existenz ähnlicher Welten nahezu trivial.¹⁸

In ersterer, *innerweltlicher* Bedeutung, auf welche wir ja auch bei Voltaire stießen, wird die Ähnlichkeit zu einem echten Problem – ein Problem, über welches die Ingenieure schon früh stolperten und welches Galileo Galilei in den *Neuen Wissenschaften* auf theoretischer Ebene anging (vgl. Valleriani 2010, 204): Wenn wir einen Bauplan beispielsweise für ein Gebäude haben und sich dieses Gebäude in einer bestimmten Ausführung tatsächlich als stabil erwiesen hat, so garantiert dies noch nicht die Stabilität in anderen Größenausführungen. Geometrische Ähnlichkeit garantiert keine dynamische Ähnlichkeit, auch wenn unsere Intuition uns das Gegenteil weismachen will.

Am Galilei'schen Beispiel lässt sich dies relativ leicht einsehen (**Abb. 7**). Skaliert man einen Bauplan, dann verhalten sich Längen, Flächen und Volumina (und somit auch Gewichte) unterschiedlich, womit sich das dynamische Gleichgewicht im Allgemeinen verschiebt. Allgemein lässt sich sagen: Je größer die Ausführung, desto größer das Gewicht – und zwar in dritter Potenz! –, was durch einen immer massiveren Bau kompensiert werden muss. Für Delbœufs Gedankenexperiment sind die Folgen noch

18 Vgl. Ehrenfest-Afanassjewa 1916. Wir verfügen zwar nicht über das Universum. Aber eine Skalierung des gesamten Universums ist (aufgrund der Relativität der Größe) formal äquivalent einer Neubeschreibung unseres aktuellen Universums mit umgekehrt skalierten Einheiten. Wir sind zwar nicht völlig frei in der Wahl der Einheiten, wenn die physikalischen Gesetze dieselben bleiben sollen, da wir nicht alle Größen unabhängig voneinander skalieren können, aber einige Freiheitsgrade bleiben gleichwohl.

leichter greifbar. Der auf die Hälfte seiner Größe reduzierte Mensch verfügt, sofern weiter aus derselben organischen Materie geschaffen, nur noch über ein Achtel seiner ursprünglichen Anzahl von Neuronen im Gehirn!

Galilei selbst übertrug seine ingenieurtechnischen Überlegungen auch auf die Tierwelt: Der Elefant stellt keine hochskalierte Gazelle dar, sondern benötigt zur Bewältigung seines Gewichts auch (unverhältnismäßig) dickere Knochen (welche Mégamicros ja in der Tat überflüssigerweise aus seiner Heimat mitbringt), und auch Delbœuf sagt ganz richtig: „Die Katze ist kein Tiger *in petto*“ (1894a, 256, siehe Abb. 7). Geht man in die entgegengesetzte Richtung immer kleinerer Größen, können die Gravitationskräfte umgekehrt an Bedeutung gegenüber anderen Kräften verlieren. Für Insekten beispielsweise (die wir Menschen erinnerlich ja für Micromégas sind) spielt die Gravitation eine untergeordnete Rolle – etwa beim Fall vom Tisch, der für uns einem Sturz aus mehreren hundert Metern Höhe entspricht, den Ameise oder Spinne aber unversehrt überstehen –, während umgekehrt die Oberflächenspannung des Wassers eine relevante Größe wird.¹⁹

Zu diesen bereits im 17. Jahrhundert bekannten Effekten gesellte sich im 20. Jahrhundert der dramatische Befund, dass man auf verschiedenen Skalen nicht nur mit unterschiedlich adjustierten Verhältnissen der bekannten Kräfte, sondern mit qualitativ neuen, völlig unbekanntem Phänomenen rechnen muss, nämlich denen der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik. „Modern physics is not universal“, stellen die beiden Heidelberger Physiker Schäfer und Bartelmann nüchtern fest (o. J., 4). Damit ist nicht gemeint, dass die Physik – contra Voltaire – prinzipielle Schranken ihrer eigenen Reichweite anerkennt, sondern dass moderne physikalische Theorien Systeme beschreiben, die, wie die oben als Beispiel herangezogene sphärische Geometrie, einen inhärenten Skalenparameter aufweisen. Relativistische Effekte tauchen erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten auf (gemessen am inhärenten Parameter der Lichtgeschwindigkeit) und quantenmechanische Effekte nur auf einer sehr kleinen Skala (gemessen am inhärenten Parameter des Planck'schen Wirkungsquantums). Man hat es folglich bei der Nicht-Universalität nicht mit einer Beschränktheit der modernen Physik zu tun, sondern im Gegenteil mit einem Erkenntnisfortschritt, da diese modernen Theorien im Gegensatz zur Newton'schen Mechanik, die die *Illusion* ihrer Universalität erzeugte, die Grenzen der von ihnen beschriebenen Effekte selbst benennen.²⁰ Skaleninvarianz ist mithin keine Eigenschaft unseres Universums im Allgemeinen, sondern vielmehr nur eine

19 Mit solchen Effekten spielt der Science-Fiction-Roman *Micro*, den der amerikanische Schriftsteller Michael Crichton unfertig hinterließ und der in einer von Richard Preston vollendeten Fassung 2011 veröffentlicht wurde. Ich danke Paul Ziche für diesen Hinweis.

20 Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass unsere heutige Welt just in den Naturkonstanten, die diese inhärenten Skalen verkörpern, die von Pascal gelegnete feste Unterlage (*assiette ferme*) sucht, indem sie die grundlegenden Maßeinheiten an diese Konstanten als ihre unerschütterliche Basis knüpft (siehe de Courtenay, Darrigol und Schlaudt 2019).

lokal zu beobachtende Besonderheit. (Dementsprechend müssen sich Ingenieure auch sehr anstrengen, um im Labor dynamisch ähnliche Modelle zu erzeugen, an welchen sie Einsichten über die Originalsysteme gewinnen können.²¹)

Auch die moderne Biologie hat die Einsicht Galileis, die dieser ja schon auf das Tierreich bezogen hatte, aufgenommen und weiterentwickelt. Einschlägig ist hier D'Arcy Wentworth Thompsons Klassiker *Über Wachstum und Form* von 1917 (der sich übrigens auf Gullivers Abenteuer in Liliput als Illustration dimensionaler Überlegungen bezieht). In der Einleitung stellte der britische Mathematiker und Biologe (1860–1948) die (rhetorische) Frage, ob Wachstum „durch einfache Größenzunahme vor sich geht ohne sichtbare Veränderung der Form oder durch eine allmähliche Änderung der Form und die langsame Entwicklung einer mehr oder weniger komplizierten Struktur“ (2006, 47). Von Bedeutung für die Biologie war diese Frage vor allem deshalb, da sich mit ihr entscheidet, ob sich nicht viele Formmerkmale, die laut Thompson vielleicht vorschnell als evolutionäre Anpassungen gedeutet wurden, in Wahrheit allein aus physikalischen Zwängen erklären lassen. Eine entscheidende Einsicht besteht dabei darin, dass sich je nach Größe diese physikalischen Zwänge ganz anders gestalten und je andere Kraftarten bestimmend sind. Steigt man auf die Skala der Insekten hinab, verliert, wie wir sahen, die Gravitation an Bedeutung, aber Kapillar- und Oberflächenkräfte spielen plötzlich eine große Rolle. In diesem Sinne ist hier nichts ‚relativ‘, sondern es kommt auf die Größe an, wie Thompson unterstreicht:

Wir sind gewohnt, Größe als eine rein relative Sache zu betrachten. [...] Gleichwohl wird in der physikalischen Wissenschaft die Skala der absoluten Größe zu einer sehr konkreten und wichtigen Angelegenheit [...]. Die Wirkung des *Maßstabs* [effect of *scale*] hängt nicht von einem Ding als solchem ab, sondern von der Beziehung zu seiner ganzen Umgebung, zu seinem Milieu; sie ist in Übereinstimmung mit des Dinges ‚Platz in der Natur‘, mit seinem Bereich der Aktion und Reaktion im Universum. Überall wirkt die Natur maßstabsgerecht [true to scale], und alles hat dementsprechend seine richtige Größe. Menschen und Bäume, Vögel und Fische, Sterne und Sternsysteme besitzen ihre angemessene Dimensionen und ihren mehr oder weniger beschränkten Bereich absoluter Größen.²²

21 Die ingenieurstechnische Methode der Modellkonstruktion findet sich systematisiert etwa von Schindler 1872, Bader 1916, Weber 1919, in der neuen Literatur bietet Heller 2011 einen hilfreichen Überblick. Die zugrunde liegende theoretische Basis in der Explizierung der Bedingungen, unter welchen Differentialgleichungen, welche die wirkenden Kräfte beschreiben, Lösungen identischen Typs haben, findet sich etwa in Schiller 1944 und Birkhoff 1955.

22 2006, 58, vgl. 1945, 24: „We are accustomed to think of magnitude as a purely relative matter. [...] Nevertheless, in physical science the scale of absolute magnitude becomes a very real and important thing [...]. The effect of *scale* depends not on a thing in itself, but in relation to its

D’Arcy Wentworth Thompson wendet sich hier direkt gegen das auf der Relativität der Größe beruhende Gedankenexperiment Leibnizens. Aber wie wir schon am Beispiel der nichteuklidischen Geometrie sahen, stellt das Vorhandensein eines ‚absoluten‘ Maßstabs keinen Widerspruch zur epistemischen Relativität der Größe dar. Zwar ist der Elefant ‚groß‘ nicht bloß im Verhältnis zur Maus, aber auch nicht als solcher. Er hat seine richtige Größe und seinen richtigen Platz *im Verhältnis zur Umwelt*, welche er mit der Maus teilt, weshalb eben die Umwelt in diesem Sinne einen absoluten, nämlich je für alle ihre Elemente gemeinsamen Maßstab vorgibt.

Der britische Genetiker J. B. S. Haldane (1892-1964) griff den Gedanken Thompsons, dass Form und Größe nicht unabhängige begriffliche Dimensionen darstellen, sondern – entgegen unserer euklidischen Erwartungshaltung – Größenänderungen in der Regel mit Formänderungen einhergehen werden, in seinem Essay „On Being the Right Size“ von 1925 auf,²³ verallgemeinerte ihn sodann aber wieder über die Schranken der Biologie hinaus: „Und genau wie für jedes Tier die beste Größe existiert, so gilt dies auch für jede menschliche Einrichtung.“²⁴ Haldane fragt in diesem Sinne beispielsweise, ob die Demokratie, welche für die Größenordnung der griechischen Polis erfunden wurde, auf der Skala eines modernen Staates überhaupt noch funktional ist. Die Antwort hängt laut Haldane auch von den technischen Mitteln ab. Rundfunk (*broadcasting*) reduziert gewissermaßen die Größe des Landes, indem er zwischen entfernten Personen einen Informationsfluss herstellt, und erlaubt es somit, die Polis auf dem Maßstab einer modernen Nation gewissermaßen zu simulieren. Eine zweite Anwendung sieht Haldane in der Planwirtschaft, die im Grunde darin besteht, „*to run every nation as a single business concern*“, was sich Haldane – obgleich bekennender Kommunist – freilich so wenig vorstellen kann wie einen „Elefanten, der Purzelbäume schlägt“.

4 Von den ähnlichen Welten zur einen Welt: Das „richtige Maß“ im Anthropozän

Es ist nun interessant, die Position Delbœufs – und somit auch Thompsons und Haldanes – in das Schema einzuordnen, welches sich in der Kette literarischer Anspielungen verbarg, auf die die Wortschöpfung des „Mégamicros“ verweist. Man sieht

whole environment or milieu; it is conformity with the thing’s ‘place in nature’, its field of action and reaction in the Universe. Everywhere Nature works true to scale, and everything has its proper size accordingly. Men and trees, birds and fishes, stars and star-systems, have their appropriate dimensions, and their more or less narrow range of absolute magnitude.“

23 Haldane 1925, 424: „For every type of animal there is a most convenient size, and a large change in size inevitably carries with it a change of form.“

24 Haldane 1925, 427: „And just as there is a best size for every animal, so the same is true for every human institution.“

sofort, dass Delbœuf den drei herausgearbeiteten kosmologischen Einstellungen eine vierte originäre Position hinzufügt:

- 1 Es gibt die „richtige“ Größe, auch wenn wir sie nicht unbedingt kennen (Montaigne).
- 2 Es gibt keine richtige Größe, und wir können sie daher auch nicht erkennen (Pascal).
- 3 Jede Größe ist richtig, und wir können die universellen Gesetze ihres Zusammenhangs erkennen (Voltaire).
- 4 Nicht jede Größe ist richtig, aber jedes Ding hat seine richtige Größe, und wir können diese erkennen (Delbœuf, Thompson, Haldane etc.).

Delbœuf und die modernen Biologen nähern sich in dieser Rekonstruktion der Position Montaignes durchaus wieder an, indem sie – gegen Voltaire – den Begriff der „richtigen Größe“ rehabilitieren, zugleich aber – mit Voltaire – an ihrer Erkennbarkeit festhalten. Dies ist eine überraschende Wendung in einer Epoche, für welche gerade die Maßstabslosigkeit das metaphysische Lebensgefühl ausmachte. – „’Tis all in pieces, and all coherence gone“ – diese Verse John Donnes aus dem Jahr 1611 wählte der Soziologe Aldo Haesler als emblematischen Ausdruck der Moderne (Haesler 2018, 245; vgl. auch seinen Beitrag im vorliegenden Band). – Umso wichtiger ist es, zu betonen, dass die Rückkehr zu einem Weltbild der „richtigen Größe“ nicht einfach ein Glaubensbekenntnis und weder Ausdruck eines kindlichen Optimismus noch einer rückwärtsgewandten Romantik ist. Es handelt sich um eine folgerichtige Aussage, aber vor dem Hintergrund einer anderen Kosmologie als bei Montaigne. Dass es die „richtige Größe“ gibt, drückt nun erst einmal die technische Einsicht aus, dass in komplexen Systemen jede Größenordnung durch ein eigenes Verhältnis der beteiligten Kräfte gekennzeichnet ist und technische Problemlösungen somit nicht unbedingt verallgemeinert werden können. Die Form hängt von der Größe ab. Diese Einsicht ist einerseits fast banal. Gleichwohl behält sie für den Alltagsverstand den Charakter eines Paradoxons, da dieser mit Begriffen von Form und Größe arbeitet, die ihm vorgaukeln, dass mit ihnen zwei unabhängige Freiheitsgrade unserer Welt benannt seien, dass also Form und Größe unabhängig voneinander variieren könnten.

Gerade zum heutigen Zeitpunkt ist diese Einsicht mit einer höchst relevanten Lehre verbunden. Wir befinden uns heute nämlich in gewisser Weise in derselben Situation, wie die Ingenieure des 16. Jahrhunderts, die nicht begreifen konnten, warum sich Gebäude und Maschinen nicht in beliebiger Größe realisieren lassen. Uns geht es heute so mit Ökosystemen und dem Erdsystem als Ganzem. Wieder haben wir die Intuition, dass eine Welt, die 4 Grad wärmer ist, genauso aussehen muss wie unsere Welt, nur eben mit einer etwas anderen Temperatur; oder dass ein Regenwald, der auf die Hälfte seiner ursprünglichen Größe reduziert wurde, ein Regenwald bleibt und denselben dynamischen Gesetzen gehorcht. Allmählich begreifen wir, dass dies nicht so ist, dass die Form nicht

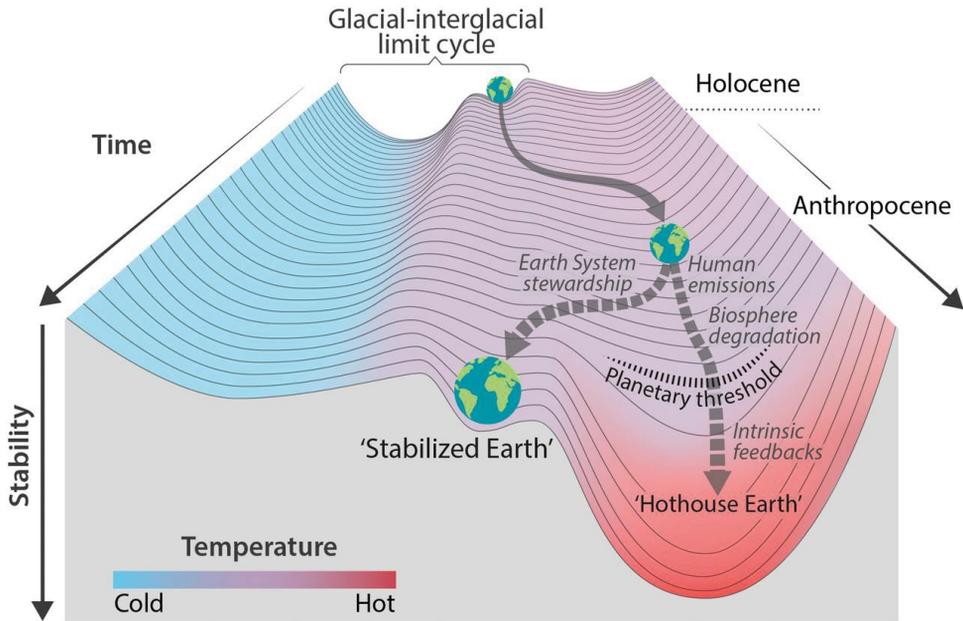


Abbildung 8 Stability landscape des Erdsystems mit der Trajektorie zu einem drohenden Hothouse Earth, nach Steffen et al. 2018.

unabhängig von der Größe ist, ja dass sie sich nicht einmal stetig mit der Größe ändern muss (wie dies bei dem Dreieck in der sphärischen Geometrie der Fall war). Die Dynamik des Erdsystems kann sich sprunghaft ändern, wenn gewisse Parameter einen Schwellenwert überschreiten (Steffen et al. 2018, siehe **Abb. 8 und 9**), und in einem System wie dem Amazonas-Regenwald können die Mechanismen der Selbststabilisierung versagen, wenn eine bestimmte Fläche unterschritten wird (Pulla et al. 2015, Zemp et al. 2017). Vermutlich ließe sich ein auf die Hälfte seiner Größe reduzierter Amazonas-Regenwald nicht mehr retten, da sich in dieser verbliebenen Hälfte aufgrund der geschrumpften Fläche das Klima so ändern würde, dass die Versteppung des restlichen Regenwaldes nicht mehr aufzuhalten wäre. Dieses Beispiel macht auch noch einmal deutlich, dass der Konflikt mit unseren gegenläufigen Intuitionen tatsächlich auf einer begrifflichen Ebene angesiedelt ist. So schrieb einst Georg Friedrich Hegel in der Absicht, den Begriff der Größe und der quantitativen im Gegensatz zur qualitativen Veränderung zu erläutern:

Wenn wir sonach unter Grenze die quantitative Grenze verstehen, und z. B. ein Acker seine Grenze, nemlich die quantitative verändert, so bleibt er Acker vor wie nach. Wenn er aber seine qualitative Grenze verändert, so ist diß seine Bestimmtheit, wodurch er Acker ist, und er wird Wiese, Wald u. s. f. (Hegel [1812–13] 1978, 110)

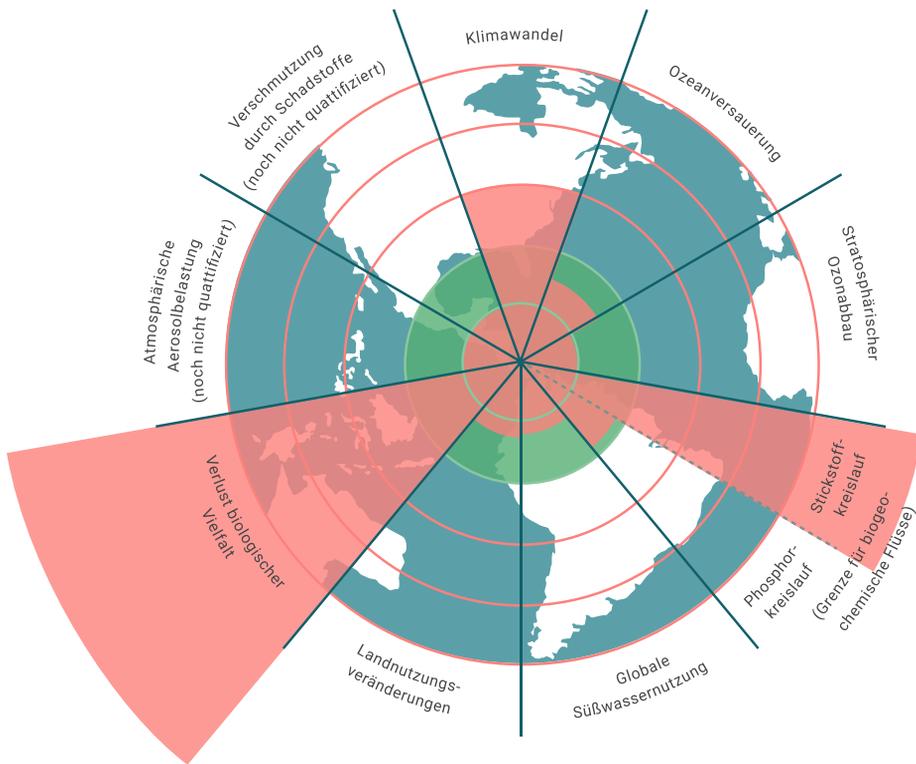


Abbildung 9 Die planetary boundaries nach Rockström et al. 2009.

Diese Sätze scheinen rein begriffliche Wahrheiten zu sein, die sich direkt aus der Definition des Größenbegriffs ergeben (siehe Schlaudt 2014). Gleichwohl werden sie durch die Erfahrungen mit dem Regenwald widerlegt: Ein Regenwald, der seine quantitative Grenze verändert, nämlich schrumpft, bleibt, wie wir gesehen haben, nicht Regenwald, sondern wird zur Steppe. Dasselbe gilt für Hegels Acker. Während er sich in der Vorstellung beliebig vergrößern lässt, gilt dies in Wirklichkeit nicht, da der Acker nicht einfach irgendein geometrisches Stück Land ist, sondern eine landwirtschaftlich *produktive* Fläche, die in ein funktionierendes Ökosystem eingebettet sein muss, damit zum Beispiel für die Bewässerung durch Wolkenbildung und Regen und für die Bestäubung der Nutzpflanzen durch Insekten gesorgt ist. Mit beliebiger Vergrößerung des Ackers verschwindet das einbettende Ökosystem und der Acker hört auf, ein Acker zu sein, um zu einem toten Stück Land zu werden. Die rein quantitative Veränderung ist eine gedankliche Abstraktion, die nicht immer und in jeder Extrapolation zur Wirklichkeit passt, aber durchaus bestimmt, was wir in der Wirklichkeit erwarten. Die ökologische Krise fordert mithin nicht nur unsere Glaubenssätze heraus, sondern auch unsere

fundamentalen Begriffsbildungen, in welchen unsere Weltanschauung sedimentiert ist. Dies ist die ‚nicht-euklidische Lektion‘ für das Anthropozän.

Es kann also kaum überraschen, dass heute, am mutmaßlichen Beginn des Anthropozäns (Crutzen 2002), der Diskurs der „richtigen Größe“ wieder auflebt. In der ökologischen und wachstumskritischen Literatur war dieses Motiv selbstverständlich schon lange präsent (auch Kenneth Bouldings Metaphernshift von der *great plane* oder *frontier* zum *spaceship earth* gehört hierher – Boulding 1966). Eine wissenschaftliche Gestalt hat es heute in den Begriffen *planetary boundaries* und *safe operating space* gefunden (Abb 9, Rockström 2009). In solchen Begriffsbildungen ringt die Menschheit heute um eine Readjustierung ihres Naturverhältnisses im Anthropozän (Raymond et al. 2013). Dazu gehört auch, dass der Mensch die richtige Größe für sich selbst herausfinden muss, wozu Bruno Latour beispielsweise den Begriff des *earthbound* vorschlägt (Latour 2015, 2017). In der historischen Perspektive von Montaigne über Pascal und Voltaire zu Delbœuf und anderen, die ich im vorliegenden Text erarbeitet habe, wird deutlich, dass sich die Begriffsarbeit der aktuellen Epoche als eine Reaktion auf die in Voltaire verkörperte Aufklärung verstehen lässt, deren Universalismus heute sowohl als theoretisches wie auch als praktisches Projekt problematisch geworden ist. In der historischen Perspektive dieses Artikels wird jedoch auch deutlich, dass zwei unterschiedliche Alternativen zum Größen-Universalismus der Aufklärung zur Verfügung stehen. Verkörpert werden sie durch Montaigne und Pascal. Letzterer steht in diesem Zusammenhang für eine Abkehr von der Aufklärung, ersterer für eine reflektierte Aufklärung, die auch über sich selbst aufgeklärt ist.

ORCID®

Oliver Schlaudt  <https://orcid.org/0000-0003-1988-7302>

Bildnachweis

Abb. 1 NASA Earth Observatory images by Joshua Stevens, using Suomi NPP VIIRS data from Miguel Román, NASA’s Goddard Space Flight Center

Abb. 2 Voltaire 1778. Bibliothèque nationale de France, Paris

Abb. 3 Pierre Louis Moreau de Maupertuis. Line engraving by J. Daullé, 1741, after R. Levrac-Tournières, 1737. Wellcome Collection. Public Domain

Abb. 4 Bayerische Staatsbibliothek, https://daten.digital-sammlungen.de/bs00087675/image_537. CC BY-NC-SA 4.0

Abb. 5 Getty Research Institute. Open Content Program

Abb. 6 Leighton 1943

Abb. 7 Galilei (1914) 2000, digitalisiert von Clara Colby für Michael Fowler, University of Virginia, 2000, <http://galileoandstein.physics.virginia.edu>

Abb. 8 <https://www.pnas.org/content/115/33/8252/tab-figures-data>, CC BY-NC-ND

Abb. 9 Bundeszentrale für politische Bildung, 2016, www.bpb.de, CC BY-NC-ND 3.0

Literatur

- Bader, Hans Georg. 1916.** „Einführung in die Dynamik der Flugzeuge mit besonderer Berücksichtigung der mechanischen Ähnlichkeit.“ *Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* 189/190: 3–46.
- Birkhoff, Garrett. 1955.** *Hydrodynamics: A Study in Logic, Fact, and Similitude*. 2. Aufl. Princeton: Princeton University Press.
- Boulding, Kenneth E. 1966.** „The Economics of the Coming Spaceship Earth.“ In *Environmental Quality in a Growing Economy*, hrsg. von Henry Jarrett, 3–14. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Courtenay, Nadine de, Olivier Darrigol, und Oliver Schlaudt, Hrsg. 2019.** *The Reform of the International System of Units (SI): Philosophical, Historical and Sociological Issues*. Abingdon: Routledge.
- Couturat, Louis. 1896.** „Études sur l'espace et le temps de MM. Lechalas, Poincaré, Delbœuf, Bergson, L. Weber, Evellin.“ *Revue de Métaphysique et de Morale* 4: 646–669.
- . **1898.** „Essai sur les fondements de la géométrie.“ *Revue de Métaphysique et de Morale* 4: 354–380.
- Crichton, Michael, und Richard Preston. 2011.** *Micro*. New York: Harper Collins.
- Crutzen, Paul J. 2002.** „Geology of Mankind.“ *Nature* 415 (6867): 23.
- Cyrano de Bérgerac, Savinien de. 1657.** *Histoire comique par Monsieur de Cyrano Bergerac contenant les Etats & Empires de la Lune*. Paris: Charles de Sercy.
- . **1662.** *Les Nouvelles œuvres de Monsieur de Cyrano Bergerac: Contenant l'Histoire comique des Etats et Empires du Soleil, plusieurs lettres et autres pieces divertissantes*. Paris: Charles de Sercy.
- Defoe, Daniel. 1705.** *The Consolidator or, Memoirs of Sundry Transactions from the World in the Moon*. London: Benjamin Bragg.
- Delbœuf, Joseph. 1860.** *Prolégomènes philosophiques de la géométrie et solution des postulats*. Liège: Desoer.
- . **1893a.** *Mégamicros ou les effets sensibles d'une réduction proportionnelle des dimensions de l'univers*. Paris: Alcan. [Extrait des *Bulletins de l'Académie royale de Belgique*, 3e série, 15(6)].
- . **1893b.** „Mégamicros, or the Sensible Effects of a Proportional Reduction of the Dimensions of the Universe.“ [Auszug] *Nature* 48 (1243): 406.
- . **1894a.** „Are the Dimensions of the Physical World Absolute?“ *The Monist* 4: 248–260.
- . **1894b.** „Réponse.“ [Antwort auf Lechalas 1894]. *Revue philosophique de la France et de l'Étranger* 37: 78–84.
- . **1894c.** „Mégamicros ou les effets sensibles d'une réduction proportionnelle des dimensions de l'univers.“ *Terre et Ciel* 14 (1er Mars 1893–16 février 1894): 393–406.
- . **1898.** „In a World Half as Large.“ *Popular Science Monthly* 52 (March): 678–687.
- Dessoir, Max. 1893/94.** „Besprechung von Delbœuf 1893a.“ *Zeitschrift für Hypnotismus, Suggestionstherapie, Suggestionstheorie und verwandte psychologische Forschungen* 2: 242–243.
- Duyckaerts, François. 1993.** *Joseph Delbœuf, philosophe et hypnotiseur*. Paris: Les Empêcheurs de penser en rond.
- Ehrenfest-Afanassjewa, Tatjana. 1916.** „On Mr. R. C. Tolman's ‚Principle of Similitude‘.“ *Physical Review*, 2nd series, 8, no. 1: 1–7.

- Feynman, Richard P. 1963.** *Lectures in Physics*. Bd. 1, *Mainly Mechanics, Radiation, and Heat*. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Foucault, Michel. (1966) 2015.** „Les mots et les choses.“ In *Œuvres*. Bd. 1, hrsg. von Frédéric Gros. Paris: Gallimard.
- Galilei, Galileo. 1933.** *Le Nuove Scienze (Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali)*. In *Le Opere di Galileo Galilei, ristampa della Edizione Nazionale*. Bd. 8. Firenze: G. Barbèra.
- . **1974.** *Two New Sciences*. Trans., with Introduction and Notes, by Stillman Drake. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin Press.
- . **(1914) 2000.** *Dialogues Concerning Two New Sciences*, hrsg. von Alfonso de Salvio und Henry Crew. New York: McMillans.
- Gilkinet, Alfred. 1905.** „Notice sur Joseph Delbœuf.“ *Annuaire de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique* 11: 47–138.
- Haesler, Aldo. 2018.** *Hard Modernity*. Paris: Éditions Matériologiques.
- Haldane, J. B. S. 1925.** „On Being the Right Size.“ *Harper's Monthly Magazine*, 1. Dezember, 1925, 424–427.
- Hegel, Georg Friedrich. (1812–1813) 1978.** *Wissenschaft der Logik*. Bd. 1, *Die objektive Logik*. In *Gesammelte Werke*. Bd. 11, hrsg. von Friedrich Hogemann und Walter Jaeschke. Hamburg: Meiner.
- Heller, Valentin. 2011.** „Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models.“ *Journal of Hydraulic Research* 49 (3): 293–306.
- Helmholtz, Hermann von. (1866) 1883.** „Ueber die Thatsächlichen Grundlagen der Geometrie.“ In *Wissenschaftliche Abhandlungen*. Bd. 2. Leipzig: Barth.
- Humboldt, Alexander von. 1845.** *Kosmos. Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*. Bd. 1. Stuttgart: Cotta.
- Laplace, Pierre Simon. 1795.** *Exposition du système du monde*. Tome 2. Paris: Imprimerie du Cercle social. <https://mdz-nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:12-bsb10060998-8>.
- Latour, Bruno. 2015.** „Telling Friends from Foes in the Time of the Anthropocene.“ In *The Anthropocene and the Global Environmental Crisis: Rethinking Modernity in a New Epoch*, hrsg. von Clive Hamilton, Christophe Bonneuil, und François Gemenne, 24–41. London: Routledge.
- . **2017.** *Facing Gaia: Eight Lectures on the New Climatic Regime*. Cambridge: Polity Press.
- Lechalas, Georges. 1894.** „M. Delbœuf et le problème de mondes semblables.“ *Revue philosophique de la France et de l'étranger* 37: 78–84.
- Lechalas, Georges. 1896.** *Étude sur l'espace et le temps*. Paris: Alcan.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm. (1849–1863) 1971.** *Mathematische Schriften* (Ed. Gerhard). Bd. 3. Reprint. Hildesheim: Olms.
- Leighton, Henry L. C. 1943.** *Solid Geometry and Spherical Trigonometry*. New York: van Nostrand.
- Lichtenberg, Georg Christoph. 1968–1974.** *Schriften und Briefe*. München: Carl Hanser.
- Lovejoy, Arthur O. 1936.** *The Great Chain of Being: A Study of the History of an Idea: The William James Lectures Delivered at Harvard University, 1933*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Lycosthenes, Conrad. 1557.** *Prodigiorum ac ostentorum chronicon*. Basel: Henricum Petri.
- Montaigne, Michel de. 1962.** *Œuvres complètes*, hrsg. von Maurice Rat. Paris: Gallimard.
- . **1998.** *Essais*. Übers. von Hans Stilett. Frankfurt am Main: Eichborn.
- Panza, Marco. 1995.** „L'intuition et l'évidence: La philosophie kantienne et les géométries non euclidiennes: Relecture d'une discussion.“ In *Les savants et l'épistémologie vers la fin du XIX^e siècle*, hrsg. von Marco Panza und Jean-Claude Pont, 39–87. Paris: Blanchard.
- Pascal, Blaise. 2000.** *Pensées*. In *Œuvres complètes*. Bd. 2, hrsg. von Michel Le Guern. Paris: Gallimard.

- Poincaré, Henri. 1906.** „La relativité de l'espace.“ *Année psychologique* 13, 1 [engl.: *Monist* 23, 161 (1913)]. <http://web.mit.edu/redingtn/www/netadv/SP20130604.html> [mit Kommentar, in welchem insbesondere auf Delbœuf eingegangen wird].
- Preston, Samuel Tolver. 1893.** „Mégamicros (Letter to the Editor).“ *Nature* 48 (1248): 517–518.
- Pulla, Sandeep, Geetha Ramaswami, Nandita Mondal, Rutuja Chitra-Tarak, H. S. Suresh, Handanakere S. Dattaraja, Pandi Vivek, Narayanaswamy Parthasarathy, Brahmasamudra R. Ramesh, und Raman Sukumar. 2015.** „Assessing the Resilience of Global Seasonally Dry Tropical Forests.“ *International Forestry Review* 17 (S2): 91–113.
- Raymond, Christopher M. 2013.** „Ecosystem Services and Beyond: Using Multiple Metaphors to Understand Human-Environment Relationships.“ *BioScience* 63 (7): 536–546.
- Risi, Vincenzo de. 2007.** *Geometry and Monadology: Leibniz's Analysis Situs and Philosophy of Space*. Basel: Birkhäuser.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter K. Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen, und Jonathan A. Foley. 2009.** „A Safe Operating Space For Humanity.“ *Nature* 461: 472–475.
- Román, Miguel O., Zhuosen Wang, Qingsong Sun, Virginia Kalb, Steven D. Miller, Andrew Molthan, Lori Schultz, Jordan Bell, Eleanor C. Stokes, Bhartendu Pandey, Karen C. Seto, Dorothy Hall, Tomohiro Oda, Robert E. Wolfe, Gary Lin, Navid Golpayegani, Sadashiva Devadiga, Carol Davidson, Sudipta Sarkar, Cid Praderas, Jeffrey Schmaltz, Ryan Boller, Joshua Stevens, Olga M. Ramos González, Elizabeth Padilla, José Alonso, Yasmín Detrés, Roy Armstrong, Ismael Miranda, Yasmín Conte, Nitzá Marrero, Kytt MacManus, Thomas Esch, und Edward J. Masuoka. 2018.** „NASA's Black Marble Nighttime Lights Product Suite.“ *Remote Sensing of Environment* 210: 113–143.
- Schäfer, Björn M., und Matthias Bartelmann. o.J.** *The Physics of Scales*. Undatiertes Vorlesungsskript. <http://www.ita.uni-heidelberg.de/research/bartelmann/files/scales.pdf>.
- Schiller, Ludwig. 1944.** „Zur Herleitung der Ähnlichkeitsbedingungen aus der Identität der Differentialgleichungen.“ *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* 24 (5/6): 280–283.
- Schindler, E. 1872.** *Theorie des Modellbaus, oder Feststellung der Beziehungen zwischen Modell und der in einem bestimmten Verhältnis vergrößerten Maschine*. Weimar: Bernhard Friedrich Voigt.
- Schlaudt, Oliver. 2014.** „Über den Begriff der Gleichgültigkeit in Hegels ‚Wissenschaft der Logik‘ und seine Anwendung in der Analyse des Größenbegriffs.“ *Hegel Studien* 47: 93–116.
- . 2020. „Measurement / Messung.“ In *Online Encyclopedia Philosophy of Nature / Online Lexikon Naturphilosophie*, hrsg. von Thomas Kirchhoff. <https://doi.org/10.11588/oepn.2020.0.76526>.
- Snow, Charles P. (1959) 1993.** *The Two Cultures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Steffen, Will, Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P. Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Sarah E. Cornell, Michel Crucifix, Jonathan F. Donges, Ingo Fetzer, Steven J. Lade, Marten Scheffer, Ricarda Winkelmann, und Hans Joachim Schellnhuber. 2018.** „Trajectories of the Earth System in the Anthropocene.“ *PNAS* 115 (33): 8252–8259.
- Swift, Jonathan. 1726.** *Gulliver's Travels*. Ursprünglich publiziert als: *Gulliver, Lemuel. 1726. Travels into Several Remote Nations of the World*. London: B. Motte.

- Thompson, D’Arcy Wentworth. (1917, 1945) 2006.** *Über Wachstum und Form.* Frankfurt am Main: Eichborn.
- . **1945.** *Growth and Form.* Cambridge: University Press.
- Valades, F. Didacus. 1579.** *Rhetorica christiana (etc.).* Pervsiae [Perugia]: Apud Petrumiacobum Petrutium.
- Torretti, Roberto. 1978.** *Philosophy of Geometry from Riemann to Poincaré.* Dordrecht: Reidel.
- Valleriani, Matteo. 2010.** *Galileo Engineer.* Boston Studies in the Philosophy of Science 269. Dordrecht: Springer.
- Voltaire. 1752.** *Mikromegas.* Dresden: Konrad Walther. [Digitalisat: <http://mdz-nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:12-bsb10099542-3>].
- . **1778.** *Romans et Contes de M. de Voltaire.* Bd. 2, 1778. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8615744z>.
- . **1979.** *Romans et contes.* Hrsg. von Frédéric Deloffre und Jacques van der Heuvel. Paris: Gallimard.
- Weber, Moritz. 1919.** „Die Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik und ihre Verwertung bei Modellversuchen.“ *Jahrbuch der schiffbautechnischen Gesellschaft* 20: 355–471.
- Zemp, Delphine Clara, Carl-Friedrich Schleussner, Henrique M. J. Barbosa, Marina Hirota, Vincent Montade, Gilvan Sampaio, Arie Staal, Lan Wang-Erlandsson, und Anja Rammig. 2017.** “Self-Amplified Amazon Forest Loss Due to Vegetation-Atmosphere Feedbacks.” *Nature Communications* 8 (1): 14681.