TUSSEN OERKNAL EN APOCALYPS

HEINO FALCKE

met JÖRG RÖMER

TUSSEN OERKNAL EN APOCALYPS

DE GROTE GESCHIEDENIS VAN ONZE PLANEET

Vertaald door Hans Out

2026 Prometheus Amsterdam

Omdat het in verreweg de meeste gevallen gaat om verwijzingen, is ervoor gekozen om dit notenapparaat onvertaald te laten.

De uitgever heeft getracht alle rechthebbenden te achterhalen. Aan hen die desondanks menen aanspraak te kunnen maken op enig recht, wordt verzocht contact op te nemen met Uitgeverij Prometheus, Herengracht 48, 1015 BN Amsterdam.

Alle rechten voorbehouden. Tekst- en datamining van (delen van) deze uitgave is uitdrukkelijk niet toegestaan.

Oorspronkelijke titel *Zwischen Urknall und Apokalypse*
© 2026 Heino Falcke en Jörg Römer
© 2026 Nederlandse vertaling Uitgeverij Prometheus en Hans Out
Omslagontwerp Rothfos & Gabler, Hamburg
Omslagbeeld Evgeni Tcherkasski
Foto auteur Boris Breuer
Vormgeving binnenwerk Mat-Zet b.v.
www.uitgeverijprometheus.nl
ISBN 978 90 446 6174 3

Noten

Woord vooraf

1 van Schaik, C. v. und K. Michel (2017), *Das Tagebuch der Menschheit* – Was die Bibel über unsere Evolution verrät, Reinbek: Rowohlt

Hoofdstuk 1: De oorsprong

1 Universe Forum, https://lweb.cfa.harvard.edu/seuforum/bb_whatpowered.htm
2 Genesis 1, 3 (Bibel Einheitsübersetzung)
3 https://home.cern/news/news/physics/atlas-gets-under-hood-higgs-mechanism Physiker sprechen vom elektroschwachen Phasenübergang, weil sich die elektroschwache und die elektromagnetische Kraft in dieser Phase der Entwicklung des Universums voneinander getrennt haben – Grund ist die elektroschwache Symmetriebrechung bei Energien, die der Temperatur des Universums zu diesem Zeitpunkt entsprechen.
4 Licht besteht aus elektromagnetischen Schwingungen und ist eine spezielle Form masseloser, freier Energie. Masselose Teilchen oder Gravitationswellen bewegen sich alle mit Lichtgeschwindigkeit, die eine fundamentale Grenzgeschwindigkeit zu sein scheint.
5 LHCb Collaboration (2025), »Observation of Charge-parity Symmetry Breaking in Baryon Decays«, e-Print 2503.16954, https://arxiv. org/abs/2503.16954
6 Rees, M. (2001), Just Six Numbers: The Deep Forces that Shape the Universe. New York: Basic Books
7 Siegel, E. (2025), »Does the Multiverse Explain our Fundamental Constants?«, Big Think, 7. März 2025, https://bigthink.com/starts-with-a-bang/multiverse-explain-fundamental-constants/
8 Um unterschiedliche Naturkonstanten miteinander zu vergleichen muss man sie dimensionslos betrachten, indem man sie geschickt miteinander kombiniert. Z. B. kann man aus den Konstanten, ħ, G, und c eine

fundamentale Längeneinheit, die Plancklänge = $\sqrt{(\hbar G/c^3)}$, definieren anstatt das Meter zu benutzen.

9 Oh, B. K., J. A. Peacock, S. Khochfar und B. D. Smith (2022), »The Fate of Baryons in Counterfactual Universes«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 517, S. 59–75, https://ui.adsabs. harvard.edu/abs/2022MNRAS.517...59O/abstract Barnes, L. A., P. J. Elahi, J. Salcido, R. G. Bower, G. F. Lewis, T. Theuns, M. Schaller, R. A. Crain und J. Schaye (2018), »Galaxy Formation Efficiency and the Multiverse Explanation of the Cosmo-logical Constant with EAGLE Simulations«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 477, S. 3727–3743, https://ui.adsabs. harvard.edu/abs/2018MNRAS.477.3727B Aber das bedeutet nicht, dass unsere heutigen kosmologischen Para-meter die wahrscheinlichsten sind: Sorini, D. (2022), »Do Anthropic Arguments Really Work?«, arXiv e-prints, arXiv:2204.07509, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022arXiv220407509S

10 Siehe z. B. die Ansichten eines Mathematikers über die Mängel des Wahrscheinlichkeitsargumentes: Landsman, K. (2015), »The Fine-Tu-ning Argument«, arXiv e-prints, arXiv:1505.05359, https://ui.adsabs. harvard.edu/abs/2015arXiv150505359L.

11 Ijjas, A., P. J. Steinhardt und A. Loeb (2014), »Inflationary Schism«, Physics Letters B, Bd. 736, S. 142–146, https://ui.adsabs.harvard. edu/abs/2014PhLB..736..142I Allerdings gibt es auch die gegenteilige Meinung: Guth, A. H., D. I. Kaiser und Y. Nomura (2014), »Inflationary Paradigm after Planck 2013«, Physics Letters B, Bd. 733, S. 112–119, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014PhLB..733..112G

12 https://de.wikipedia.org/wiki/Infinite-Monkey-Theorem

13 »No Words to Describe Monkeys' Play« (2003), BBC News, 9. Mai 2003, http://news.bbc.co.uk/2/hi/3013959.stm

14 Dyson, L., M. Kleban und L. Susskind (2002), »Disturbing Implications of a Cosmological Constant«, Journal of High Energy Physics, Bd. 2002, S. 011, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002JHEP...10..011D

15 Kinney, W. H. und N. K. Stein (2022), »Cyclic Cosmology and Geodesic Completeness«, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Bd. 2022, Art.-Nr 011, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022JCAP...06..011K

16 Für eine genauere Diskussion, wie die dunkle Energie wirkt und warum der Vergleich mit dem Druck auch irreführend sein kann, siehe die Diskussion von Sean Carroll, »Why Does Dark Energy Make the Universe Accelerate?«, https://www.preposterousuniverse.com/blog/2013/11/16/why-does-dark-energy-make-the-universe-accelerate/

17 Siegel, E. (2023), »If the Hubble Tension Is Real, What's the Solution?«, Big Think, 17. August 2023, https://bigthink.com/starts-with-a-bang/hubble-tension-real-solution/

18 Holland, M. (2025), »Largest 3D Map of the Universe: More Evidence of Variable Dark Energy«, heise online, 20. März 2025, https://www.heise.de/en/news/Largest-3D-map-of-the-universe-More-evidence-of-variable-dark-energy-10323026.html

19 Siegel, E. (2021), »94% of the Universe's Galaxies Are Permanently beyond our Reach«, Big Think, 18. Oktober 2021, https://bigthink.com/starts-with-a-bang/universes-galaxies-unreachable/

20 Die Gottesvorstellung der großen monotheistischen Religionen schließt diese Definiton ein, geht aber über sie hinaus

21 Bischoff, M. (2022), »Lässt sich Gott mathematisch beweisen?«, *Spektrum*, 2. September 2022, https://www.spektrum.de/kolumne/ontologischer-beweis-goedel-zeigt-dass-gott-existiert-oder-nicht/2052687 Gödel, K. (1931), »Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I«, Monatshefte für Mathe-matik und Physik Bd. 38, S. 173–198, doi:10.1007/BF01700692, https://link.springer.com/article/10.1007/BF01700692

22 »Gödels ›Gottesbeweis‹ bestätigt«, Freie Universität Berlin, 17. Oktober 2013, https://www.fu-berlin.de/presse/informationen/fup/2013/fup_13_308/index.html

23 Schumacher, J. (2022), »Max Planck: Der Entdecker des Quantensprungs«, *PRO*, Das christliche Medienmagazin, 4. Oktober 2022, https://www.pro-medienmagazin.de/max-planck-der-entdecker-des-quantensprungs/

24 Schaefer, A. (2011), »Der Alte würfelt nicht«, Dlf Kultur, 12. November 2011, https://www.deutschlandfunkkultur.de/der-alte-wuerfelt-nicht-100.html

25 Dale, E. (2022), »Eddington and Religion: Eye of the Soul«, Enlightened Crowd, 17. Mai 2022, https://enlightenedcrowd.org/eddington-and-religion-eye-of-the-soul/

26 Dieser Satz kursiert in vielen Zitatsammlungen, ist aber nicht gut belegt. Oft wird noch hinzugefügt: »Jetzt ist die Zeit, mehr zu verstehen, sodass wir weniger fürchten müssen.« Aber das kann auch ein späterer Zusatz sein. https://todayinsci.com/C/Curie_Marie/CurieMarie-Quotations.htm

27 Lemaître, G. (1931), »The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory«, *Nature*, Bd. 127, S. 706, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1931Natur.127..706L/abstract

28 Univ. Löwen & Foto in Privatarchiv. Ich frage mich, ob Lemaître bei dem Bild des Schleiers vielleicht auch an den Vorhang im jüdischen Tempel denkt, der den Zugang zum Allerheiligsten verbirgt, aber bei der Kreuzigung Christi zerreißt. Gottes Nähe erfährt man dann nicht über die Wissenschaft, sondern im Bild des auferstandenen Christus.

Hoofdstuk 2: Materie, sterren, sterrenstelsels en zwarte gaten

1 1933 durch Carl Jansky, vgl. z. B. This Month in Physics History, 5. Mai 1933: »The New York Times Covers Discovery of Cosmic Radio Waves«, https://www.aps.org/publications/apsnews/201505/physicshistory.cfm

2 Herzberg, G. (1988), »Historical Remarks on the Discovery of Interstellar Molecules«, Journal of the Royal Astronomical Society of Canada, Bd. 82, S. 115, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988JRASC..82..115H/abstract

3 Z. B. Mathews, G. J., M. Kusakabe und T. Kajino (2017), »Introduction to Big Bang Nucleosynthesis and Modern Cosmology«, Internatio-nal Journal of Modern Physics E, Bd. 26, Art.-Nr. 1741001, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017IJMPE..2641001M

4 Typischerweise sagt man, dass Elektronen ca. 1 Sekunde nach dem Urknall ausfrieren (https://www.astronomy.ohio-state.edu/weinberg.21/A873/notes5.pdf), allerdings kann sich die Annihilation von Positronen und Elektronen bis zu anderthalb Stunden (16 keV) hinziehen, vgl. Thomas, L. C., T. Dezen, E. B. Grohs und C. T. Kishimoto (2020), »Electron-Positron Annihilation Freeze-out in the Early Universe«, Physical Review D, Bd. 101, https://arxiv.org/pdf/1910.14050

5 Hutschenreuter, S., S. Dorn, J. Jasche, F. Vazza, D. Paoletti, G. Lavaux und T. A. Enßlin (2018), »The Primordial Magnetic Field in Our Cosmic Backyard«, Classical and Quantum Gra-vity, Bd. 35, Art.-Nr. 154001, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018CQGra..3504001H Subramanian, K. (2016), »The Origin, Evolution and Signatures of Primordial Magnetic Fields«, Reports on Progress in Physics, Bd. 79, Art.-Nr. 076901, https://arxiv.org/pdf/1504.02311 Carretti, E., F. Vazza, S. P. O'Sullivan, V. Vacca, A. Bonafede, G. He-ald, C. Horellou, S. Mtchedlidze und T. Vernstrom (2025), »On the Nature of LOFAR RMs and New Constraints on Magnetic Fields in Cosmic Filaments and on Magnetogenesis Scenarios, https://arxiv. org/abs/2411.13499 Mit Dank an Franco Vazza für eine Diskussion auf Mastodon, wo ich mehr über seine Arbeit erfuhr.

6 Dies entspricht einer Temperatur von 1010 Kelvin und einer Energie von ungefähr 1 MeV (= eine Million Elektronenvolt, 1 MeV = 1,6 × 10–13 Joule). Dies wiederum entspricht dem Energieunterschied zwischen Protonen und Neutronen, wenn man deren Ruhemasse in Energieeinheiten angibt – es fehlt die nötige Energie für den Teilchenumwandlungsprozess.

7 Dieser Begriff kommt von der Abkürzung »QSR« – »Quasi-stellar radio sources«. Diese weit entfernten Objekte sahen im Teleskop, weil ihre Muttergalaxien so weit entfernt waren, zunächst wie Sterne aus, hatten aber eine erstaunlich helle Radiostrahlung, die, wie man erst später feststellte, von Plasmajets Schwarzer Löcher kommen.

8 Cooke, R. J., M. Pettini und C. C. Steidel (2018), »One Percent De-

termination of the Primordial Deuterium Abundance«, The Astrophysical Journal, Bd. 855, Art.-Nr. 102, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...855..102C/abstract

9 Neben Wasserstoff und Helium entstehen auch ein paar andere Isotope, deren quantitative Verhältnisse das Urknallmodell aufs Prozent genau vorhersagen kann. Bestimmte Isotope, wie zum Beispiel das 3He, wurden quasi ausschließlich im Urknall erzeugt. Dieses Isotop ist heute noch in unserem Erdkern eingeschlossen. Vgl. Gough, E. (2022), »Primordial Helium, Left Over From the Big Bang, is Lea-king Out of the Earth«, Universe Today, 4. April 2022, https://www.universetoday.com/155270/primordial-helium-left-over-from-the-big-bang-is-leaking-out-of-the-earth/ Es ist aber auch auf der Mondoberfläche zu finden und wird als möglicher Brennstoff für Kernfusionsreaktoren angesehen. Leider sind die uns zugänglichen Vorräte zu gering.

10 https://de.wikipedia.org/wiki/Körperflüssigkeit

11 Tatsächlich entstanden auch noch ein paar Isotope von Wasserstoff, Helium, Lithium und Beryllium, aber das war es dann auch schon.

12 Zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich über sogenannte Lyman-α--Strahlun. Dies ist Ultraviolettstrahlung, die durch das Zurückfallen von angeregten Elektronen in das Grundenergieniveau des Atom-kerns erzeugt wird.

13 Die mittlere Dichte im Universum beträgt 100 Sekunden nach dem Urknall 10 g/cm3 und im Zentrum der Sonne 160 g/cm3. Die Dichte von Wasser ist 1 g/cm3.

14 Ein Helium-Atomkern mit zwei Protonen und zwei Neutronen wiegt weniger als die vier einzelnen Protonen, aus denen er ursprünglich entstanden ist. Dieser Massenunterschied wird nach Einsteins berühmter Formel E = mc2 in Energie umgesetzt. Umgekehrt gilt, dass das Auseinanderbrechen des Heliumkerns Energie kostet. Das ist dieselbe Energiemenge, die beim Verschmelzen frei wird. Achtung: Um bei der Kernspaltung Energie freizusetzen, braucht man möglichst schwere Atomkerne, die nicht so gut zusammenhalten und bei denen die Spaltung energetisch günstiger abläuft. Kernfusion hingegen erfolgt mit leichteren Elementen.

15 »This Month in Physics History – January 1, 1925: Cecilia Payne-Gaposchkin and the Day the Universe Changed«, American Physical Society, https://www.aps.org/apsnews/2015/01/cecilia-payne-gaposchkin-universe-changed

16 Eddington, A. S. (1920), »The Internal Constitution of the Stars«, Nature, Bd. 106, S. 14–20, https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1920Obs....43..341E, siehe auch Atkinson, R. D. E. and F. G. Houtermans (1929), »Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen«, Zeitschrift für Physik, Bd. 54, S. 656–665, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1929ZPhy...54..656A

17 Burbidge, E. M., G. R. Burbidge, W. A. Fowler und F. Hoyle (1957), »Synthesis of the Elements in Stars«, Reviews of Modern Physics, Bd. 29, S. 547–650, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1957RvMP...29..547B

18 Bondi, H. und T. Gold (1948), »The Steady-State Theory of the Expanding Universe«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 108, Heft 3, Juni 1948, S. 252–270, https://academic. oup.com/mnras/article/108/3/252/2603423?login=true

19 Trimble, V. (2020), »E. Margaret Burbidge (1919–2020), Astronomer and Co-Discoverer of Evidence that Elements Are Made in Stars«, *Nature*, 27. April 2020, https://www.nature.com/articles/d41586-020-01224-9

20 Ebd.

21 Trimble, V. (2010), »Geoffrey Ronald (Geoff) Burbidge 1925–2010«, Astronomy & Geophysics, Bd. 51, Heft 2, April 2010, S. 237–238, https://academic.oup.com/astrogeo/article/51/2/2.37/251681

22 In der Astronomie werden sie widersinnigerweise »Population III« genannt, obwohl sie ja die 1. Generation sind. Population I sind dagegen jüngere Sterne wie unsere Sonne.

23 Aber es gibt zumindest Kandidaten, Fujimoto, S. et al. (2025), »GLIMPSE: An Ultra-Faint $\simeq 10^5\ M\odot$ Pop III Galaxy Candidate and First Constraints on the Pop III UV Luminosity Function at z≃ 6–7«, arXiv e-prints, arXiv:2501.11678, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025arXiv250111678Fhttps:// www.sciencealert.com/we-may-have-finally-laid-eyes-on-the-universes-very-first-stars

24 Klessen, R. S. und S. C. O. Glover (2023), »The First Stars: Formation, Properties, and Impact«, Annual Reviews, Bd. 61, S. 65–130, 7. Juni 2023, https://doi.org/10.1146/annurev-astro-071221-053453

25 https://de.wikipedia.org/wiki/Schalenbrennen

26 »Neutron Star with Eleven Kilometres Radius«, Max-Planck-Gesellschaft, 10. März 2020, https://www.mpg.de/14575466/how-big-is-a-neutron-star Capano, C. D., I. Tews, S. M. Brown, B. Margalit, S. De, S. Kumar, D. A. Brown, B. Krishnan und S. Reddy (2020), »Stringent Cons-traints on Neutron-Star Radii from Multimessenger Observations and Nuclear Theory«, Nature Astronomy, Bd. 4, S. 625–632, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020NatAs...4..625C

27 Auch wenn es eine Männerdomäne ist, so gibt es auch Sprengmeisterinnen: https://www.fr.de/fr7/frau-knallen-laesst-11016467.html

28 Johnson, J. A., B. D. Fields und A. T. Thompson (2020), »The Origin of the Elements: a Century of Progress«, The Royal Society Publishing, 17. August 2020, https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2019.0301

29 »Welche Elemente kommen im menschlichen Körper vor?«, Ask a Biologist, https://askabiologist.asu.edu/german/atome-leben

30 Mehr dazu in meinem ersten Buch Licht im Dunkeln – Schwarze Löcher, das Universum und wir, Stuttgart: Klett-Cotta, 2020

31 Lea, R. (2023), »Brightest Gamma-Ray Explosion of all Time Scrambled Earth's upper Atmosphere«, Livescience, 16. November 2023, https://www.livescience.com/space/black-holes/brightest-gamma-ray-explosion-of-all-time-scrambled-earths-upper-atmosphere

32 Kulkari, S. (2024), »How Dwarf Galaxies Lit Up the Universe after the Big Bang«, *Nature*, 28. Februar 2024, https://www.nature.com/articles/d41586-024-00594-8

33 Etwa 7 Prozent der baryonischen Materie liegen in Form von Sternen vor, allerdings macht die baryonische Materie nur ein Sechstel der gesamten Materie im Universum aus, der Rest ist Dunkle Materie. Vgl. ESA (2018), The Cosmic Budget of Ordinary Matter, ESA, 20. Juni 2018, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/06/The_cosmic_budget_of_ordinary_matter

34 Dies ist eine Konsequenz des »Jeanskriteriums«, das besagt, dass Gaswolken kollabieren, wenn ihre Gravitationskraft größer ist als der Gasdruck und die Masse des Objekts über einer für die typische Dichte und Temperatur kritischen Masse liegt. Bei der Entwicklung kosmischer Fluktuationen sind es zunächst die kleinen Regionen mit Überdichten, deren Masse über der kritischen Jeansmasse liegt. https://de.wikipedia.org/wiki/Jeans-Kriterium

35 Rix, H.-W., V. Chandra, R. Andrae et al. (2022), »The Poor Old Heart of the Milky Way«, The Astrophysical Journal, Bd. 941, 12. Dezember 2022, https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac9e01

36 ESA (2025), »Gaia, ESA's Billion Star Surveyor«, ESA, https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia

37 https://www.space.com/billion-light-year-wide-galaxy-bubble-big-bang

38 »Forscher identifizieren zwei der frühesten Bausteine der Milchstraße«, Max-Planck-Institut für Astronomie, 21. März 2024, https://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2024-05-shakti-shiva

39 Natürlich erscheint alles, was näher ist, auch größer und heller. Diesen Effekt muss man selbstverständlich herausrechnen. Talcott, R. (2024), »Early Galaxies May Be Smaller than Initially Thougt«, Astronomy, 26. September 2024, https://www.astronomy.com/science/early-galaxies-may-be-smaller-than-initially-thought/

40 Genesis 3, 19 (Elberfelder Bibel)

41 Cooper, K. (2024), »What Does Space Smell Like?«, *Space*, 8. Januar 2024, https://www.space.com/what-does-space-smell-like#

42 Whalen, D. J., M. A. Latif und C. Jessop (2025), »Abundant Water from Primordial Supernovae at Cosmic Dawn«, Nature Astronomy, 3. März 2025, https://www.nature.com/articles/s41550-025-02479-w

43 Manche Modelle spekulieren auch über Hunderttausende Sonnenmassen, die entweder durch einen wahren Monsterstern oder den direkten Kollaps einer riesigen Urwolke entstanden sein könnten.

44 Ob »niemals« wirklich niemals bedeutet oder dies nur für eine unfassbar große Zeit gilt, besprechen wir im letzten Kapitel.
45 Unter der Annahme, dass ein E-Auto 15 kWh pro 100 km verbraucht und ca. 15 000 Kilometer pro Jahr fährt. Das Sandkorn wäre dabei rund 0,5 mm groß, mit einer Dichte von 2 g/cm3.
46 Der Filmemacher John Kantara hat diesen Aspekt in einem sehr populären Dokumentarfilm für den Sender Arte belichtet: »Leben aus dem All – Schwarze Löcher & Meteoriten«, https://www.kantara.de/2021/01/24/leben-aus-dem-all-1-2-schwarze-loecher-meteoriten-2-2/
47 Madau, P. und M. Dickinson (2014), »Cosmic Star-Formation History«, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Bd. 52, S. 415–486, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ARA%26A..52..415M/abstract

Hoofdstuk 3: De aarde wordt gesmeed

1 Falcke, H., F. Melia und E. Agol (2000), »Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center«, The Astrophysical Journal, Bd. 528, S. 113–116, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000ApJ...528L..13F Siehe auch mein Buch, Licht im Dunkeln, Stuttgart: Klett-Cotta, 2020
2 »Grand Canyon's Rocks Are Incredibly Old«, National Park Service, https://www.nps.gov/places/000/grand-canyon-s-rocks-are-incredibly-old.htm
3 Hansen, K. (2021), »Arizona's Meteor Crater«, NASA Earth Observatory, 31. Mai 2021, https://earthobservatory.nasa.gov/images/148384/arizonas-meteor-crater Melosh, H. J. und G. S. Collins (2005), »Meteor Crater Formed by Low-Velocity Impact«, *Nature*, Bd. 434, Ausgabe 157, 9. Mai 2005, https://www.nature.com/articles/434157a
4 Das ist eine grobe Schätzung. Allerdings war die letzte Sternenexplosion in unserer Milchstraße, die Menschen gesehen haben, Keplers Supernova von 1604. Supernovae aus anderen Galaxien werden täglich am Nachthimmel mit robotischen Teleskopen entdeckt.
5 Die heutige Sternentstehungsrate beträgt ca. 3 Sonnenmassen pro Jahr und ist in den letzten 9 Milliarden Jahren relativ konstant geblieben, mit einem möglichen Einbruch vor 5 bis 7 Milliarden Jahren. del Alcázar-Julià, M., F. Figueras, A. C. Robin et al. (2025), »Joint Inference of the Milky Way Star Formation History and IMF from Gaia All-Sky G<13 data«, arXiv e-prints, arXiv:2501.17236, Januar 2025, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025arXiv250117236D Licquia, T. C. und J. A. Newman (2015), »Improved Estimates of the Milky Way's Stellar Mass and Star Formation Rate from Hierarchical Bayesian Meta-Analysis«, The Astrophysical Journal, Bd. 806, Art.-Nr. 96, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...806...96L Snaith, O., M. Haywood, P. Di Matteo, M. D. Lehnert et al. (2015), »Reconstructing the Star Formation History of the Milky Way Disc(s) from Chemical Abundances«, Astronomy

and Astrophysics, Bd. 578, Art.-Nr. A87, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015A&A...578A..87S

6 Gritschneder, M., D. N. C. Lin, S. D. Murray et al. (2012), »The Supernova Triggered Formation and Enrichment of Our Solar System«, The Astrophysical Journal, Bd. 745, Art.-Nr. 22, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012ApJ...745...22G Forbes, J. C., J. Alves und D. N. C. Lin (2021), »A Solar System Formation Analogue in the Ophiuchus Star-Forming Complex«, *Nature* Astronomy, Bd. 5, S. 1009–1016, https://www.nature.com/articles/s41550-021-01442-9

7 Arakawa, S. und E. Kokubo (2023), »Number of Stars in the Sun's Birth Cluster Revisited«, Astronomy and *Astrophysics*, Bd. 670, Art.-Nr. A105, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023A%26A...670A.105A/abstract

8 Mit dem schönen Namen »Solar Sibling 1«, Webb, J. J., N. Price-Jones, J. Bovy et al. (2020), »Searching for Solar Siblings in APOGEE and Gaia DR2 with N-body Simulations«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 494, S. 2268–2279, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020MNRAS.494.2268W/abstract

9 Durch diesen Prozess wird auch Drehimpuls – das Beharren der Materie, sich weiter zu drehen – abgebaut und nach außen entsorgt. Im Folgenden konzentrieren wir uns auf den Staub, aber die proto-planetare Scheibe besteht immer aus Staub und Gas.

10 »Läuterung« ist ein Prozess zur Reinigung und Separierung von Stoffen, z. B. zur Metallgewinnung durch Schmelzen von Erzen.

11 Sargent, B. A. et al. (2009), »Silica in Protoplanetary Disks«, The Astrophysical Journal, Bd. 690, S. 1193–1207, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009ApJ...690.1193S/abstract

12 Woitke, P., J. Drążkowska, H. Lammer et al. (2024), »CAI Formation in the Early Solar System«, Astronomy and Astrophysics, Bd. 687, Art.-Nr. A65, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024A%26A...687A..65W/abstract

13 Feldspäte, Lexikon der Geowissenschaften, https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/feldspaete/4675

14 Ein Isotop ist eine Variante eines chemischen Elementes, das zwar dieselbe Anzahl Protonen, aber mehr oder weniger Neutronen im Kern hat.

15 Patterson, C. (1956), »Age of Meteorites and the Earth«, Geochimica et Cosmochimica Acta, Bd. 10, S. 230–237, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1956GeCoA..10..230P/abstract

16 Piralla, M., J. Villeneuve, N. Schnuriger et al. (2023), »A Unified Chronology of Dust Formation in the Early Solar System«, *Icarus*, Bd. 394, April 2023, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103523000040

17 https://en.wikipedia.org/wiki/Formation_and_evolution_of_the_Solar_System

18 Parker, E. T., H. L. McLain, D. P. Glavin et. al. (2023), »Extraterres-trial Amino Acids and Amines Identified in Asteroid Ryugu Samples Retur-

ned by the Hayabusa2 Mission«, Geochimica et Cosmochimica Acta, Bd. 347, 15. April 2023, S. 42–57, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703723000923 Glavin, D. P., J. P. Dworkin, C. M. O'D. Alexander et al. (2025), »Ab-undant Ammonia and Nitrogen-Rich Soluble Organic Matter in Samples from Asteroid (101955) Bennu«, *Nature Astronomy*, Bd. 9, 29. Januar 2025, S. 199–210, https://www.nature.com/articles/s41550-024-02472-9

19 Die Strömungsinstabilität funktioniert ungefähr so: Die ersten Schneebälle und Kieselsteine bewegen sich zusammen mit dem Gas, aus dem die Scheibe entstanden ist. Ab einer bestimmten Größe erfahren die Brocken eine Art Gegenwind und werden abgebremst, sodass sie in relativ kurzer Zeit in die Sonne stürzen sollten. Wenn sich aber viele Steine zusammenfinden, dann nehmen sie das Gas mit und beschleunigen es – der Gegenwind verschwindet, die Bremswirkung wird reduziert, und die Steine bleiben auf ihrem Orbit. Steinchen, die auf entfernteren Orbits abgebremst wurden, gesellen sich dazu und verstärken den Effekt. Ohne diesen Effekt hätten diese planetaren Saatkörner Schwierigkeiten, von Kiesel-größe zu metergroßen Brocken heranzuwachsen.

20 Astronomen glauben eine solche Kollision und die Entstehung einer Staubwolke im Sternensystem □ Pictoris mit Weltraumteleskopen indirekt beobachtet zu haben: Candanosa, R. M. (2024), »Webb Tele-scope Reveals Asteroid Collision in Neighboring Star System«, Johns Hopkins University, 10. Juni 2024, https://hub.jhu.edu/2024/06/10/webb-telescope-asteroid-collision-beta-pictoris/

21 King, B. (2023), »Scientists Confirm: Meteorite Crashed into New Jersey Home«, Sky & Telescope, 15. Mai 2023, https://skyandtelescope.org/astronomy-news/scientists-confirm-meteorite-crashed-into-new-jersey-home/

22 Halliday, A. N. und R. M. Canup (2023), »The Accretion of Planet Earth«, Nature Reviews Earth & Environment, Bd. 4, 29. November 2022, S. 19–35, https://www.nature.com/articles/s43017-022-00370-0 Einen interessanten Aspekt erzählte mir Susanne Pfalzner vom Forschungszentrum Jülich bei der Generalversammlung der IAU (International Astronomical Union) in Kapstadt, wo sie ein Poster präsentierte und argumentierte, dass interstellare Objekte, Schrapnelle und Asteroiden aus anderen Sternensystemen in großem Maße auch in unserem Sonnensystem eingefangen gewesen sein sollten und so als Saatkörner für Planeten gedient haben könnten. Pfalzner, S., D. Paterson, M. T. Bannister und S. Portegies Zwart (2021), »Interstellar Objects Follow the Collapse of Molecular Clouds«, The Astrophysical Journal, Bd. 921, Art.-Nr. 168, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ApJ...921..168P/abstract Pfalzner, S. (2024), »Interstellar Objects as Seeds for Planet Formation«, IAU General Assembly, Poster-Nr. 1033, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024IAUGA..32P1033P

23 https://en.wikipedia.org/wiki/Neptune

24 Diese Kombination aus zwei großen Riesen wie Jupiter und Saturn scheint relativ ungewöhnlich unter den Sonnensystemen unserer Galaxie zu sein – sie kommt nur bei 1 % der Planetensysteme vor. Bei der Fülle an Planetensystemen ist dies aber auch kein völlig singuläres Ereignis.

25 D'Angelo, G. et al. (2021), »Growth of Jupiter: Formation in Disks of Gas and Solids and Evolution to the Present Epoch«, *Icarus*, Bd. 355, Februar 2021, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019103520304358?via%3Dihub

26 Mosher, D. (2007), »Trading Cosmic Places: Neptune and Uranus Swapped Spots«, *Space*, 18. Dezember 2007, https://www.space.com/4755-trading-cosmic-places-neptune-uranus-swapped-spots.html

27 Raymond, S. N. und A. Morbidelli (2022), »Planet Formation: Key Mechanisms and Global Models«, in: Biazzo, K. et al. (Hg.), Demographics of Exoplanetary Systems. Lecture Notes of the 3rd Advanced School on Exoplanetary Science (Astrophysics and Space Science Library, Bd. 466), Cham: Springer, S. 3–82; Raymond, S. N., A. Izidoro und A. Morbidelli (2020), »Solar System Formation in the Context of Extrasolar Planets«, in: Meadows, V. et al. (Hg.), Planetary Astrobiology, Tucson: University of Arizona Press, S. 287–324. Allerdings gibt es an diesem Szenario inzwischen einige Zweifel.

28 Auch hier gibt es noch Diskussionen, wie schnell dies alles passiert ist. Manche Autoren gehen von einer Entstehung in nur 5 Millionen Jahren aus: Schiller, M., M. Bizzarro und J. Siebert (2020), »Iron isotope Evidence for very Rapid Accretion and Differentiation of the Proto-Earth«, Science Advances, Bd. 6, Art.-Nr. eaay7604, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SciA.6.7604S Es ist aber nicht klar, ob dieses Szenario wirklich mit allen Daten konsistent ist: Morbidelli, A., T. Kleine und F. Nimmo (2025), »Did the Terrestrial Planets of the Solar System Form by Pebble Accretion?«, *Earth and Planetary Science Letters*, Bd. 650, Art.-Nr. 119120, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025E&PSL.65019120M

29 Halliday, A. N. und R. M. Canup (2023), »The Accretion of Planet Earth«, Nature Reviews Earth & Environment, Bd. 4, 29. November 2022, S. 19–35, https://www.nature.com/articles/s43017-022-00370-0

30 Yuan, Q. et al. (2023), »Moon-Forming Impactor as a Source of Earth's Basal Mantle Anomalies«, *Nature*, Bd. 623, 1. November 2023, S. 95–99, https://www.nature.com/articles/s41586-023-06589-1 Starr, M. (2023), »Scientists Detect Traces of an Ancient Alien World Beneath Earth's Mantle«, Science Alert, 2. November 2023, https://www.sciencealert.com/scientists-detect-traces-of-an-ancient-alien-world-beneath-earths-mantle

31 »New Supercomputer Simulation Sheds Light on Moon's Origin« (2023), NASA's Ames Research Center, https://www.youtube.com/wat-

ch?v=kRlhlCWplqk Kegerreis, J. A. et al. (2022), »Immediate Origin of the Moon as a Post-impact Satellite«, The Astrophysical Journal Letters, Bd. 937, Ausgabe 2, https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac8d96 Tavares, F. (2022), »Collision May Have Formed the Moon in Mere Hours, Simulations Reveal«, NASA, 4. Oktober 2022, https://www.nasa.gov/solar-system/collision-may-have-formed-the-moon-in-mere-hours-simulations-reveal/ Palm, T. (2022), »Entstehung des Mondes, neue Theorie: Großer Knall oder langsames Verschmelzen?«, Geo, 24. Oktober 2022, https://www.geo.de/wissen/weltall/entstehung-des-mondes--grosser-knall-oder-langsames-verschmelzen--32844934.html

32 Stüeken, E. E., S. L. Olson, E. Moore und B. J. Foley (2024), »The Early Earth as an Analogue for Exoplanetary Biogeochemistry« *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Bd. 90, S. 515–558, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024RvMG...90..515S Lichtenberg, T., L. K. Schaefer, M. Nakajima und R. A. Fischer (2023), »Geophysical Evolution during Rocky Planet Formation«, in: Inutsuka, S.-I. et al. (Hg.), Protostars and Planets *VII* (ASP Conference Series, Bd. 534), *San Francisco: Astronommical Society of the Pacific* (vgl. Sec. 3.3.3), https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023ASPC..534..907L

33 Watson, C. (2024), »Strange Blobs Deep within Earth May Have Created Plate Tectonics«, Science Alert, 9. Mai 2024, https://www.sciencealert.com/strange-blobs-deep-within-earth-may-have-created-plate-tectonics

34 Wissenschaftler vermuten, dass die Einschlagrate bis ca. 3,9 Milliarden Jahre vor der heutigen Zeit sogar noch zugenommen haben könnte, und sprechen vom »Late Heavy Bombardment« der Erde. Allerdings bleibt unklar, wie belastbar die Daten in diesem Fall sind. Es kann auch sein, dass die Einschlagrate graduell abgenommen hat. Trotzdem war sie in dieser Phase deutlich höher als heute.

35 Kirkland, C. L., T. E. Johnson, J. Kaempf et al. (2025), »A Paleoarchean impact crater in the Pilbara Craton, Western Australia«, Nature Communications, Bd. 16, 6. März 2025, Art.-Nr. 2224, aber es gibt dazu auch Kritik, siehe: »Earth's ›oldest‹ impact crater is much younger than previously thought«, The Conversation, 9. 7. 2025, https://theconversation.com/earths-oldest-impact-crater-is-much-younger-than-previously-thought-new-study-259803

36 https://de.wikipedia.org/wiki/Erde#Aufbau Williams, M. (2014), »What Percent of Earth Is Water?«, Universe Today, 2. Dezember 2014, https://phys.org/news/2014-12-percent-earth.html

37 »Neptune Facts«, NASA, https://science.nasa.gov/neptune/neptune-facts/

38 Gohlan, A. (2017), »There's as much Water in Earth's Mantle as in all the Oceans«, New Scientist, 7. Juni 2017, https://www.newscientist.com/article/2133963-theres-as-much-water-in-earths-mantle-as-in-all-the-oceans/

39 Helmenstine, A. M. (2019), »Elemental Composition of the Human Body by Mass., Typical Elements in a Person«, ThoughtCo., 3. Fe-bruar 2019, https://www.thoughtco.com/elemental-composition-human-body-by-mass-608192

Hoofdstuk 4: Oceanen en atmosferen

1 Angeblich sollen 99 Prozent allen irdischen Goldes im Kern liegen, genug, um die Landoberfläche der Erde mit einer einen halben Me-ter dicken Goldschicht zu überziehen. »Core«, National Geographic, https://education.nationalgeographic.org/resource/core/#

2 Urban, K. und F. Konitzer (2022), »Warum hat die Welt Inge Lehmann vergessen?«, AstroGeo, 19. Mai 2022, https://astrogeo.de/die-entdeckerin-des-inneren-erdkerns/

3 Canup, R. M. (2004), »Simulations of a Late Lunar-Forming Impact«, *Icarus*, Bd. 168, Ausgabe 2, S. 433–456, https://doi.org/10.1016/j.icarus.2003.09.028 Kegerreis J. A. et al. (2022), »Immediate Origin of the Moon as a Post-impact Satellite«, The Astrophysical Journal Letters, Bd. 937, Nr. 2, https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac8d96 Canup, R. M. (2012), »Forming a Moon with an Earth-Like Composition via a Giant Impact«, *Science*, Bd. 338, Ausgabe 6110, S. 1052–1055, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6476314/

4 Der exakte Wert der Abbremsung hängt vom inneren Aufbau der Erde und des Mondes ab, aber auch von der Möglichkeit, die entstehende Hitze abzugeben, und viel später auch von der Verteilung der Kontinente und Ozeane.

5 Farhat, M. et al. (2022), »The Resonant Tidal Evolution of the Earth-Moon Distance«, Astronomy & Astrophysics, Bd. 665, 5. September 2022, https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2022/09/aa43445-22/aa43445-22.html Meckien, R. (2016), »When a Day Lasted only 4 Hours«, Institute of Advanced Studies of the University of São Paolo, 16. März 2016, http://www.iea.usp.br/en/news/when-a-day-lasted-only-four-hours

6 Die Stunde ist hier definiert als 3600 Sekunden und nicht als ein 24tel des Tages. Die Anzahl der Stunden bleibt auch nur konstant unter der Annahme, dass die Erde genau da geboren wurde, wo sie heute noch ist. Allerdings wissen wir, dass auch Planeten migrieren können: Walsh, K. J. et. al. (2011), »A Low Mass for Mars from Jupiter's Early Gas-Driven Migration«, *Nature*, Bd. 475, S. 206–209, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011Natur.475..206W Verbleibende Asteroiden in der Scheibe können im Prinzip dafür gesorgt haben, dass die Erde näher an der Sonne war (oder weiter weg). In exakt welchem Abstand die Erde stand, wissen wir daher nicht mit letzter Sicherheit und daher auch nicht die exakte Länge der Jahre.

7 Dies schreibe ich nur, weil die meisten Menschen mir sagen, dass sie Kaffeeduft tatsächlich herrlich finden. Ich persönlich gehöre zu der kleinen Minderheit, die mit Kaffee nicht viel anfangen kann.

8 Zahnle, K., L. Schaefer und B. Fegley (2010), »Earth's Earliest Atmospheres«, Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 23. Juni 2010, https://cshperspectives.cshlp.org/content/2/10/a004895.long

9 Lea, R. (2024), »The Key Ingredients for Life on Earth Came from Space. New Evidence Suggests«, Space.com, 11. Oktober 2024, https://www.space.com/ingredients-for-life-came-from-space-new-study

10 Lichtenberg, T., L. K. Schaefer, M. Nakajima und R. A. Fischer(2023), »Geophysical Evolution during Rocky Planet Formation«, in: Inutsuka, S.-I. et al. (Hg.), Protostars and Planets *VII* (ASP Conference Series, Bd. 534), San Francisco: Astronommical Society of the Pacific (vgl. Sec. 3.2.3, S. 24), https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023ASPC..534..907L

11 Genesis 1,7 (Lutherbibel)

12 Natürlich weiß kein Mensch, was genau die Autoren der Genesis vor Augen hatten, aber es ist eine schöne Allegorie, die hier gut passt. Aus dem Begriff »Feste« klingt wohl noch das alte babylonische Weltbild einer festen Himmelsschale durch. Der Prophet Jesaja (40,22) spricht dahingehend von einem Himmel, der ausgespannt ist wie ein Schleier und ausgebreitet wird wie ein Zelt. Mit dem Himmel verbinden sich also viele Vorstellungen. Für weitere Diskussionen zu diesem Aspekt siehe: Gerhardt, M. (2021), Firmament und Kosmos. Schöpfungstheologie im Denkhorizont des Alten Orients als Prototyp eines Dialogmodells für Theologie und Naturwissenschaft, Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht

13 Lichtenberg, T., L. K. Schaefer, M. Nakajima, und R. A. Fischer (2023), »Geophysical Evolution during Rocky Planet Formation«, in: Inutsuka, S.-I. et al. (Hg.), Protostars and Planets *VII* (ASP Conference Series, Bd. 534), San Francisco: Astronommical Society of the Pacific (vgl. Sec. 3.3.3), https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023ASPC..534..907L (vgl. Sec. 3.3.3)

14 Stüeken, E. E. et al. (2024), »The Early Earth as an Analogue for Exoplanetary Biogeochemistry«, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Bd. 90, S. 515–558, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024RvMG...90..515S

15 Zahnle, K. et al. (2007), »Emergence of a Habitable Planet«, *Space* Science Reviews, Bd. 129, S. 35–78, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007SSRv..129...35Z/abstract

16 Ich finde das immer sehr verwirrend, da für mich ein Mantel das oberste und kälteste Kleidungsstück ist. Aber vielleicht muss man sich den Erdmantel auch als einen besudelten Mantel nach einem Schlammlauf vorstellen, der überall noch mit einer dreckigen Kruste bedeckt ist.

17 Rafferty, J. P., »Hadeon Eon«, Britannica, https://www.britannica.com/science/Hadean-Eon

18 Korenaga, J. (2021), »Was there Land on the Early Earth?«,Life, 26.

Oktober 2021, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8623345/ Gegenwärtig liegt die Durchschnittstiefe bei 3,7 km «How Deep Is the Ocean?«, Oceanexplorer, https://oceanexplorer. noaa.gov/facts/ocean-depth.html Charette, M. A. und W. H. F. Smith (2015), »The Volume of Earth's Ocean«, Oceanography, Bd. 23, Nr. 2, S. 112–114, https://tos.org/oceanography/article/the-volume-of-earths-ocean

19 Ianeselli, A. et al. (2022), »Water Cycles in a Hadean CO_2 Atmosphere Drive the Evolution of Long DNA«, Nature Physics, Nr. 18, S. 579–585, https://www.nature.com/articles/s41567-022-01516-z

20 Ein Teil des CO_2 lagert sich irgendwann am Grund des Meeres ab und kann dann mithilfe diverser Prozesse wieder dem Erdmantel zugeführt werden. Ob diese Prozesse wirklich schon so früh stattgefunden haben und welche es genau sind, ist ein Punkt lebhafter Diskussionen.

21 Kasting, J. F. (2014), »Atmospheric composition of Hadean-Early Archean Earth: The importance of CO«, in: Earth's Early Atmosphere and Surface Environment, hg. v. George H. Shaw, Geologist Society of America, Bolder: GSA, S. 19–36

22 Goldblatt, C. und K. J. Zahnle (2011), »Faint Young Sun Paradox Remains«, *Nature*, Bd. 474, S. 744–747, https://www.nature.com/articles/nature09961

23 Das heißt unter der Annahme, dass die Albedo, also der Rückstrahlungsfaktor, 10 Prozent ist. Die heutige Erde hat dahingegen eine Albedo von 30 Prozent, weil Kontinente und vor allem die Eisflächen mehr Licht zurückspiegeln.

24 Natürlich heizt die Erdwärme von unten, aber Erdkruste und Tiefe des Ozeans haben eine isolierende Wirkung.

25 Da niemand genau weiß, wie hoch der CO_2-Gehalt der Atmosphäre wirklich war, ist es nicht völlig ausgeschlossen, dass auch in früher Zeit die Erde schon zumindest teilweise eingefroren war. Da es noch so gut wie keine Kontinente gab, sind frühe Zeugnisse eines solchen Eisschelfs im wahrsten Sinne des Wortes dahingeschmolzen. Die Erde kann im Prinzip auch einen anderen Abstand zur Sonne gehabt und dadurch mehr Hitze abbekommen haben. Wenn die Erde 15 Prozent näher an der Sonne war, hätte dies die schwache Sonne ausgeglichen. Aber dies wäre wohl nur für die ersten paar hundert Millionen Jahre eine Option gewesen, als es noch größere Planetenmigrationen gab.

26 Johan Cruyff, der den Satz popularisiert, aber nicht erfunden hat. De Jong, Y. (2022), »Elk nadeel heeft zijn voordeel«, Jong Neerlandistiek, 24. Januar 2022, https://neerlandistiek.nl/2022/01/elk-nadeel-heeft-zijn-voordeel/

27 Wissenschaftler reden in diesem Zusammenhang von »late veneer«, der späten Furnierung oder Verzierung der Erde.

28 Lichtenberg, T., L. K. Schaefer, M. Nakajima und R. A. Fischer (2023), »Geophysical Evolution during Rocky Planet Formation«, in: Inutsuka,

S.-I. et al. (Hg.), Protostars and Planets *VII* (ASP Conference Series, Bd. 534), San Francisco: Astronommical Society of the Pacific, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023ASPC..534..907L

29 Genesis 1,9 (Lutherbibel)

30 Harrison, T. M. und A. Lenardic (2023), »Burke's Law: Toward a Reasoned Discussion of Deep Time«, Geoscienceworld, http://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-pdf/18/5/354/5762982/gselements-18-5-354.pdf

31 Die Grenze Hadaikum-Eoarchaikum ist seit 2023 definiert mit den ältesten bekannten Gesteinen (Acasta-Gneis): Grayson,S. B. et al. (2022), »Evaluating the Age Distribution of Exposed Crust in the Acasta Gneiss Complex Using Detrital Zircons in Pleistocene Eskers«, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Bd. 23, Ausgabe 5, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022GC010380 »Global Boundary Stratotype Section and Points«, International Commission on Stratigraphy, https://stratigraphy.org/gssps/#archean Es gibt allerdings 4,4 Milliarden alte Zirkone von den australischen Jack Hills, die darauf hindeuten, dass vielleicht schon vorher eine erste kontinentale Kruste auftauchte: Wilde, S. A. et al. (2001), »Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr ago«, *Nature*, Bd. 409, S. 175–178, https://www.nature.com/articles/35051550 Die meisten Lavas aus dem Archaikum sind aber unter Wasser entstanden, sodass am Anfang wohl wenig Land aus dem Wasser ragte, siehe Sec. 4.2.2 in Brown, M., T. Johnson und N. J. Gardiner (2020), »Plate Tectonics and the Archean Earth«, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 48, S. 291–320, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AREPS..48..291B

32 Caperton Morton, M. (2017), »When and how Did Plate Tectonics Begin on Earth?«, Earthmagazine, 15. Mai 2017, https://www.earthmagazine.org/article/when-and-how-did-plate-tectonics-begin-earth (siehe auch Referenzen im nächsten Kapitel)

33 Hasenberg, C. (2020), »A Brief Introduction to Zircon Geochronology«, Geological Society of the Oregon Country, 17. Dezember 2020, https://www.gsoc.org/news/2020/12/07/zircon

34 »The Moon's Biggest and most Ancient Crater Is more Circular than Previously Thought« (2024), College of Computer, Mathematical & Natural Sciences, 6. Dezember 2024, https://cmns.umd.edu/news-events/news/moons-biggest-and-most-ancient-crater-more-circular-previously-thought; Vogel, T., »Moon Craters«, Science NASA, https://science.nasa.gov/moon/lunar-craters/

35 Turner, S. et al. (2025), »Formation and Composition of the Earth's Hadean Protocrust«, *Nature*, Bd. 640, S. 390–394, https://www.nature.com/articles/s41586-025-08719-3

36 Brown, M., T. Johnson und N. J. Gardiner (2020), »Plate Tectonics and

the Archean Earth«, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 48, S. 291–320, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AREPS..48..291B

37 Orf, D. (2024), »A Study Tells the Truth about how the First Continents Formed. It's Not What You Thought«, Popular Mechanics, 2. Februar 2024, https://www.popularmechanics.com/science/environment/a46610766/how-continents-formed/

38 Salewski, C., »Alfred Wegener«, Alfred Wegener Institut, https://www.awi.de/ueber-uns/organisation/alfred-wegener.html

39 »Beginn der Plattentektonik enträtselt«, scinexx, 7. April 2014, https://www.scinexx.de/news/geowissen/beginn-der-plattentektonik-entraetselt/

40 https://de.wikipedia.org/wiki/Plume_(Geologie)

Hoofdstuk 5: De grote sluier – het ontstaan van het leven

1 Baumgartner, R. J. et al. (2019), »Nano–Porous Pyrite and Organic Matter in 3.5-Billion-Year-Old Stromatolites Record Primordial Life«, Geology, Bd. 47, S. 1039–1043, https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article-abstract/47/11/1039/573756/Nano-porous-pyrite-and-organic-matter-in-3-5

2 Einige Studien behaupten sogar, dass Leben schon 300 Millionen Jahre nach dem Einschlag entstanden sein könnte, aber diese basieren auf indirekten Argumenten und nicht auf direkten Fossilien-funden und weisen einen großen Unsicherheitsfaktor auf: Service, R. F. (2024), »Our Last Common Ancestor Lived 4.2 Billion Years ago – perhaps Hundreds of Millions of Years Earlier than Thought«, *Science*, 12. Juli 2024, https://www.science.org/content/article/our-last-common-ancestor-lived-4-2-billion-years-ago-perhaps-hundreds-millions-years

3 Siehe die Diskussion um diese Entdeckung: Nutman, A. P. et al. (2016), »Rapid Emergence of Life Shown by Discovery of 3,700-Mil-lion-Year-Old Microbial Structures«, *Nature*, Bd. 537, Art.-Nr. 535–538, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016Natur.537..535N Zawaski, M. J. et al. (2021), »Reply: The Isua (Greenland) ›Relict Stromatolites‹ Cannot Be Confidently Interpreted as Ori-ginal Sedimentary Structures«, Earth and Planetary Science Letters, Bd. 562, Art.-Nr. 116851, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021E&PSL.56216851Z Nutman, A. P. et al. (2021), »In Support of Rare Relict ☒3700 Ma Stromatolites from Isua (Greenland)«, Earth and Planetary Science Letters, Bd. 562, Art.-Nr. 116850, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021E&PSL.56216850N

4 Dazu »Martin Van Kranendonk on the Earliest Life on Earth«, Geology Bites Podcast with Oliver Strimpel, https://www.geologybites.com/martin-van-kranendonk

5 Enriquez Rascon, J. E. (2019), Searching the Transient Radio Sky, Dissertation, Radboud University, 2019, Kap. 7, »A Search for Technosignatures from the Solar Neighbourhood with LOFAR«

6 Die Frage, warum außerirdische Lebensformen uns noch nicht gefunden haben, wird auch als Fermi-Paradox bezeichnet – nach dem berühmten Physiker Enrico Fermi, der gefragt haben soll »Wo sind sie alle?«,https://www.britannica.com/story/the-fermi-paradox-where-are-all-the-aliens

7 Andreoli, C. (2025), »Hubble Reveals Observable Universe Contains 10 Times More Galaxies Than Previously Thought«, NASA *Science*, 31. März 2025, https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-reveals-observable-universe-contains-10-times-more-galaxies-than-previously-thought/

8 Aus Watson, B., »More Monkey Business«, web.archive, 28. Juli 2000, https://web.archive.org/web/20150418004018/https://www.nutters.org/docs/more-monkeys Die Anzahl T der Versuche, die man braucht, ist ungefähr T~KL, wobei K die Anzahl der verfügbaren Zeichen ist und L die Länge des Textes. Die Wahrscheinlichkeit, den Text zu erhalten, ist dann P ~ 1-(1/(e^(T/K^L))).

9 Natürlich wissen wir nicht genau, wie viele Ozeane und Moleküle es im Universum gibt, aber selbst wenn ich die Zahl um einen Faktor 10 oder 100 unterschätzt hätte, würde es das grundlegende Argument nicht ändern.

10 Musser, G. (2015), »Kosmische Würfelspiele«, *Spektrum*, 21. Oktober 2015, https://www.spektrum.de/magazin/der-zufall-im-kosmos/1368111

11 Whiteside, G. M. (2007), »Revolutions in Chemistry«, Chemical & Engineering News, 26. März 2007, https://pubsapp.acs.org/cen/coverstory/85/8513cover1.html?

12 Die Physikerin Sabine Hossenfelder lehnt dagegen diesen Gedanken in ihrem Buch Das hässliche Universum: Warum unsere Suche nach Schönheit die Physik in die Sackgasse führt (Frankfurt a. M.: Fischer, 2018) komplett ab.

13 Das ist in den Niederlanden eine besondere Stufe in der akademischen Lehre, die es erlaubt, ohne große Verpflichtungen frei der Forschung nachzugehen.

14 Dekker, C. und Koenderink, G. (o. J.), »Creating Life from Lifeless Biomolecules with AI and Lab Evolution«, TU Delft, https://www.tudelft.nl/en/2024/tbm/creating-life-from-lifeless-biomolecules-with-ai-and-lab-evolution

15 Auf Deutsch müsste das eigentlich »Ursprung-Exzellenz-Haufen« heißen, aber irgendwie scheint man die englische Variante zu bevorzugen.

16 »Natuurkundige Cees Dekker krijgt 40 miljoen voor baanbrekend onderzoek: ›Ik speel voor God‹« (2024), npo radio 1, https://www.nporadio1.nl/nieuws/wetenschap-techniek/e745b9fe-0e32-43a2-8125-feaf17e59ffc/natuurkundige-cees-dekker-krijgt-40-miljoen-voor-baanbrekend-onderzoek-ik-speel-voor-god

17 Miller, J. (2023), »How Dormant Bacteria Return to Life«, Harvard Medical School, 27. April 2023, https://hms.harvard.edu/news/how-dormant-bacteria-return-life Than, K. (2006), »Lazarus Microbe's Immortality Secret Revealed«, Live Science, 28. September 2006, https://www.livescience.com/1029-lazarus-microbe-immortality-secret-revealed.html

18 »Mechanism of Replication (Advanced)«, Cold Spring Harbor Laboratory, https://dnalc.cshl.edu/resources/3d/04-mechanism-of-replication-advanced.html

19 Tatsächlich gibt es die Vorstellung vom »Intelligent Design«, die behauptet, aus der Komplexität des Lebens könne man die Existenz Gottes beweisen. Ich halte das für eine Überschätzung menschlicher Einsichtsfähigkeit und eine Unterschätzung göttlicher Kreativität.

20 Gilbert, W. (1986), »Origin of Life: The RNA World«, *Nature*, Bd. 319, Nr. 618, https://www.nature.com/articles/319618ao Castelvecchi, Davide (2022), »Origin of Life Theory Involving RNA-Protein Hybrid Gets New Support«, Scientific American, 18. Mai 2022, https://www.scientificamerican.com/article/origin-of-life-theory-involving-rna-protein-hybrid-gets-new-support/ Bernhardt, H. S. (2012), »The RNA World Hypothesis: the Worst Theory of the Early Evolution of Life (Except for All the Others)«, Biology Direct, Bd. 7, Nr. 23, https://biologydirect.biomedcentral.com/articles/10.1186/1745-6150-7-23

21 Ball, Philip (2020), »Flaws in the RNA World«, Chemistryworld, 12. Februar 2020, https://www.chemistryworld.com/opinion/flaws-in-the-rna-world/4011172.article

22 »But if (& oh what a big if) we could conceive in some warm little pond with all sorts of ammonia & phosphoric salts,—light, heat, electricity &c present, that a protein compound was chemically formed, ready to undergo still more complex changes, at the present day such matter wd be instantly devoured, or absorbed, which would not have been the case before living creatures were formed.« Brief von Charles Darwin an J. D. Hooker, 1. Februar 1871, https://www.darwinproject.ac.uk/letter/DCP-LETT-7471.xml

23 Miller, S. L. (1953), »Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions«, *Science*, Bd. 117, S. 528–529, https://www.science.org/doi/10.1126/science.117.3046.528 Lorenzen, D. (2018), »Berühmtes Wissenschaftsexperiment, Lebensfreundliche Ursuppe in Chicago«, Deutschlandfunk, 5. August 2018, https://www.deutschlandfunk.de/beruehmtes-wissenschaftsexperiment-lebensfreundliche-100.html

24 Hess, B. L., S. Piazolo und J. Harvey (2021), »Lightning Strikes as a Major Facilitator of Prebiotic Phosphorus Reduction on Early Earth«, Nature Communications, Bd. 12, Nr. 1535, https://www.nature.com/articles/s41467-021-21849-2

25 Pearce, B. K. D. et al. (2024), »Organic Hazes as a Source of Life's Buil-

ding Blocks to Warm Little Ponds on the Hadean Earth«, *The* Planetary Science Journal, Bd. 5, Nr. 1, S. 1–24, https://iopscience. iop.org/article/10.3847/PSJ/ad17bd

26 Fields, H. (2010), »The Origins of Life«, Smithsonian Magazine, Oktober 2010, https://www.smithsonianmag.com/science-nature/the-origins-of-life-60437133/

27 Martin, W. et al. (2008), »Hydrothermal Vents and the Origin of Life«, Nature Reviews Microbiology, Bd. 6, Nr. 9, S. 805–814, https://www.nature.com/articles/nrmicro1991

28 Dodd, M. S. et al. (2017), »Evidence for Early Life in Earth's Oldest Hydrothermal Vent Precipitates«, *Nature*, Bd. 543, Nr. 7643, S. 60–64, https://www.nature.com/articles/nature21377

29 Brand, D. (1999), »Gold Finds Our Deep Hot Biosphere Teeming with Life and Controversy«, Cornell Chronicle, 26. Januar 1999, https://news.cornell.edu/stories/1999/01/gold-finds-our-deep-hot-biosphere-teeming-life-and-controversy

30 »Life in Deep Earth Totals 15 to 23 Billion Tonnes of Carbon«, Deep Carbon Observatory, 10. Dezember 2018, https://web.archive.org/web/20181230091455/https://deepcarbon.net/life-deep-earth-totals-15-23-billion-tonnes-carbon

31 Diskussion mit Pete Worden in Oxford, 2024, Search for Life in the Universe, NASA OCS Seminars, https://www.nasa.gov/ames-ocs/ocs-seminars/dr-s-pete-worden/

32 Horneck, G. (1981), »Survival of Microorganisms in Space. A Review«, Advances in Space Research, Bd. 1, Nr. 14, S. 39–48, https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11541716/ Deshevaya, E. A. et al. (2024), »Survival of Microorganisms during Two-Year Exposure in Outer Space Near the ISS«, Scientific Reports, Bd. 14, Nr. 334, 3. Januar 2024, https://www.nature.com/articles/s41598-023-49525-z

33 Marchant, J. (2020), »Life on Mars: The Story of Meteorite ALH84001«, Science Focus, 15. September 2020, https://www.sciencefocus.com/space/life-on-mars-the-story-of-meteorite-alh84001

34 Choi, J. et al. (2023), »Oxidation of Iron by Giant Impact and Its Implication on the Formation of Reduced Atmosphere in the Early Earth«, Science Advances, Bd. 9, Nr. 12, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adi6096 Jones, C. K. et al. (2024), »Setting the Stage: Building and Maintai-ning a Habitable World and the Early Conditions That Could Favor Life's Beginnings on Earth and Beyond«, arXiv, 30. Oktober 2024, https://arxiv.org/abs/2410.23344 Osinski, G. R. et al. (2020), »The Role of Meteorite Impacts in the Origin of Life«, Astrobiology, Bd. 20, S. 1121–1149, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AsBio..20.1121O

35 Oza, A. (2022), »Could the Blueprint for Life Have Been Generated in Asteroids?«, NASA, 26. April 2022, https://www.nasa.gov/solar-system/could-the-blueprint-for-life-have-been-generated-in-asteroids/

36 Furukawa, Y. et al. (2020), »Ancient Asteroid Impacts Created the Ingredients of Life on Earth and Mars«, ScienceDaily, 8. Juni 2020, https://www.sciencedaily.com/releases/2020/06/200608092939.htm

37 Walton, C. R. et al. (2024), »Cosmic Dust Fertilization of Glacial Prebiotic Chemistry on Early Earth«, Nature Astronomy, Bd. 8, S. 556–566, https://www.nature.com/articles/s41550-024-02212-z

38 Konitzer, F. et al. (2024), »Von Tümpeln zu Tiefseevulkanen: Woher stammt das Leben?«, AstroGeo, 11. Juli 2024, https://astrogeo.de/von-tuempeln-zu-tiefseevulkanen-woher-stammt-das-leben/ Preiner, M. et al. (2020), »The Future of Origin of Life Research: Bridging Decades-Old Divisions«, Life, Bd. 10, Nr. 3, 26. Februar 2020, https://www.mdpi.com/2075-1729/10/3/20

39 Wohl auch Kohlenmonoxid (CO) und Stickstoff (N_2); Martin, W. F., V. Zimorski und M. C. Weiss (2017), »Wo lebten die ersten Zellen – und wovon?«, Biologie unserer Zeit, Nr. 47, S. 186–192, https://www.molevol.hhu.de/fileadmin/redaktion/Fakultaeten/Mathematisch-Naturwissenschaftliche_Fakultaet/Biologie/Institute/Molekulare_Evolution/Dokumente/Martin_et_al_BIUZ_2017.pdf

40 Ein Prozess, der Serpentinisierung genannt wird, weil Serpentinit – Schlangenstein – erzeugt wird. Ein nicht unpassender Name, wenn man über die Genese des Lebens redet und bedenkt, dass Schlangen in Schöpfungsmythen oft eine wichtige Rolle spielen: https://de.wikipedia.org/wiki/Serpentinisierung

41 Preiner, M. et al. (2020), »A Hydrogen-Dependent Geochemical Analogue of Primordial Carbon and Energy Metabolism«, *Nature* Ecology & Evolution, Bd. 4, S. 534–542, https://www.nature.com/articles/s41559-020-1125-6; Einen Film mit mehr Details findet man hier: https://www.youtube.com/watch?v=MEzYizkq3eU; bzw. auch hier: https://www.molevol.hhu.de/animationsfilme

42 https://en.wikipedia.org/wiki/Last_universal_common_ancestor Interessanterweise haben Bio-Moleküle, welche die Chemie des Lebens bestimmen, die Eigenschaft der Chiralität (das heißt, ein Molekül lässt sich nicht durch Rotation oder Translation mit seinem Spiegelbild in Deckung bringen). Sie können im Prinzip rechts- wie linksdrehend sein. In allen irdischen Lebensformen gibt es bis heute aber immer nur eine ausgezeichnete Drehrichtung, obwohl im All beide vorkommen. LUCA hat wohl eine gewählt. Warum, weiß niemand. Einen richtigen Vorteil hat keine Orientierung. Gab es kosmische Faktoren? Oder ist das ein Hinweis auf einen einmaligen Zufall? Oder hat die eine Form die andere verdrängt? Beim berüchtigten Contergan-Skandal Ende der 50er- und Anfang der 60er-Jahre hatte ein Stoff die falsche Chiralität und erzeugte bei Kindern Missbildungen. Würden wir heute Leben mit anderer Chiralität erzeugen, könnte das sogar lebensgefährlich werden, denn die beiden Formen vertragen sich nicht. https://www.alexandria-magazin.

at/magazin/contergan-skandal-erklaert.php Schadwinkel, A. (2024), »Warum Forscher vor ›Spiegelleben‹ warnen«, Der Spiegel, 25. Dezember 2024, https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/synthetische-biologie-warum-forscher-vor-spiegelleben-warnen-a-9610fee2-a67b-418f-8447-37dd300c45ce

43 Moissl-Eichinger, C. et al. (2017), »Human Age and Skin Physiology Shape Diversity and Abundance of Archaea on Skin«, Scientific Reports, Bd. 7, Nr. 4039, https://www.nature.com/articles/s41598-017-04197-4 Moissl-Eichinger, C. und C. Schleper (2022), »Human Skin-As-sociated Archaea«, Universität Wien, https://archaea.univie. ac.at/research/christa-schleper-lab/former-projects/human-skin-associated-archaea/

44 https://de.wikipedia.org/wiki/Meiose

45 Chu, J. (2020), »Origins of Earth's Magnetic Field Remain a Mystery«, *MIT* News, 8. April 2020, https://news.mit.edu/2020/origins-earth-magnetic-field-mystery-0408 »Das Erdmagnetfeld: Ein riesiger Dynamo«, ESA, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Das_Erdmagnetfeld_Ein_riesiger_Dynamo

46 Starr, M. (2021), »Asteroids May Have Delayed the Evolution of Earth's Atmosphere«, ScienceAlert, 21. Oktober 2021, https://www.sciencealert.com/asteroids-may-have-delayed-the-evolution-of-earth-s-atmosphere »2.5-Billion-Year-Old Rocks Reveal Volcanic Eruptions Spurred First Whiffs of Oxygen in Earth's Atmosphere«, SciTechDaily, 6. November 2021, https://scitechdaily.com/2-5-billion-year-old-rocks-reveal-volcanic-eruptions-spurred-first-whiffs-of-oxygen-in-earths-atmosphere/

47 Drabon, N. et al. (2024), »Effect of a Giant Meteorite Impact on Paleoarchean Surface Environments and Life«, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Bd. 121, Nr. 44, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2408721121

48 Basinger, C. et al. (2024), »Constraints on the Early Luminosity History of the Sun: Applications to the Faint Young Sun Problem«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 534, Ausgabe 3, S. 2968–2985, https://academic.oup.com/mnras/article/534/3/2968/7811326

49 Mann, M. E. (2023), Our Fragile Moment: How Lessons from Earth's Past Can Help Us Survive the Climate Crisis, New York: PublicAf-fairs, S. 47

50 Lovelock, J. E. und L. Margulis (1974), »Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: the Gaia Hypothesis«, Tellus A, Bd. 26 (1–2), S. 2–10

51 Genesis 1, 12–13 (Lutherbibel)

52 https://en.wikipedia.org/wiki/Microbial_mat#The_earliest_mats

53 Sciworthy Team (2014), »3.5 Billion-Year-Old Microbial Mats in Sedimentary Rock Found in Australia«, Sciworthy, 16. Juni 2014, https://sciworthy.com/3-5-billion-year-old-microbial-mats-in-sedimentary-rock-found-in-australia/ Wobei man hier noch immer etwas Vorsicht walten

lassen muss, weil dies auf rein morphologischen Argumenten beruht. Aber es sieht wohl schon sehr überzeugend aus, siehe Podcast »Martin Van Kranendonk on the Earliest Life on Earth«, Geology Bites, https://www.geologybites.com/martin-van-kranendonk

54 https://de.wikipedia.org/wiki/Cyanobakterien

55 Schirrmeister, B. et al. (2013), »The Human Microbiome Project: Extending the Microbial Horizon«, PubMed Central, 14. Januar 2013, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3562814/ Schopf, J. W. und B. Packer (1987), »Early Archean (3.3-Billion to 3.5-Billion-Year-Old) Microfossils from Warrawoona Group, Australia«, *Science*, Bd. 237, Ausgabe 4810, S. 70–73, https://www.science.org/doi/10.1126/science.11539686

56 Service, R. F. (2021), »First Organism to Use Oxygen May Have Appeared Surprisingly Early«, *Science*, 25. Februar 2021, https://www.science.org/content/article/first-organism-use-oxygen-may-have-appeared-surprisingly-early

57 Kump, L. R. (2008), »The Rise of Atmospheric Oxygen«, *Nature*, Bd. 451, S. 277–278, https://www.nature.com/articles/nature06587 Gumsley, A. P. et al. (2017), »Timing and Tempo of the Great Oxidation Event«, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Bd. 114, Nr. 8, S. 1811–1816, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1608824114

58 Ostrander, C. M. et al. (2024), »Onset of Coupled Atmosphere – Ocean Oxygenation 2.3 Billion Years Ago«, *Nature*, Bd. 631, S. 335–339, https://www.nature.com/articles/s41586-024-07551-5 Poulton, S. W. et al. (2021), »A 200-Million-Year Delay in Permanent Atmospheric Oxygenation«, *Nature*, Bd. 592, S. 232–236, https://www.nature.com/articles/s41586-021-03393-7

59 https://en.wikipedia.org/wiki/Huronian_glaciation »Huronian Glaciation« (2011), in: Encyclopedia of Astrobiology, Bd. 2, Berlin u. a.: Springer, S. 768–772, https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-642-11274-4_742 Die ersten Hinweise auf dieses Ereignis wurden am Huronsee an der Grenze zwischen Kanada und den USA gefunden. Es wird auch »paläoproterozoische Vereisung« genannt.

60 Kirschvink, J. (2005), »Evolutionary Accident Probably Caused the Worst Snowball Earth Episode«, Caltech, 1. August 2005, https://www.caltech.edu/about/news/evolutionary-accident-probably-caused-worst-snowball-earth-episode-study-shows-1026 Kopp, R. E. et al. (2005), »The Paleoproterozoic Snowball Earth: A Climate Disaster Triggered by the Evolution of Oxygenic Photosynthesis«, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Bd. 102, Ausgabe 32, S. 11131–11136, https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0504878102

61 Kurucz, S. et al. (2021), »Earth's First Snowball Event: Evidence from the Early Paleoproterozoic Huronian Supergroup«, *Precam-brian Rese-*

arch, Bd. 365, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301926821003363

62 Mann, M. E. (2023), Our Fragile Moment: How Lessons from Earth's Past Can Help Us Survive the Climate Crisis, New York: PublicAffairs, S. 48

63 Albedo (lat.) ist ein Maß für die »Weiße« einer Oberfläche und bestimmt, wie viel Licht reflektiert wird.

64 Sullivan, W. (2023), »How Life Could Have Survived the Frozen ›Snowball Earth‹«, Smithsonian Magazine, 14. April 2023, https://www.smithsonianmag.com/smart-news/how-life-could-have-survived-the-frozen-snowball-earth-180981939/ Ein Beispiel aus einer späteren Schneeball-Erdzeit

65 https://de.wikipedia.org/wiki/Nordatlantikstrom

66 Marshall, M. (2024), »Geology's Biggest Mystery: When Did Plate Tectonics Start to Reshape Earth?«, *Nature*, 14. August 2024, https://www.nature.com/articles/d41586-024-02602-3 Brown, M., T. Johnson und N. J. Gardiner (2020), »Plate Tectonics and the Archean Earth«, Annual Review of Earth and Planetary *Sciences*, Bd. 48, S. 291–320, https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-earth-081619-052705

67 https://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_internal_heat_budget

68 Morton, M. C. (2017), »When and How Did Plate Tectonics Begin on Earth?«, Earth, 15. Mai 2017, https://www.earthmagazine.org/article/when-and-how-did-plate-tectonics-begin-earth

69 Lowe, D. R. (2013), »Crustal Fracturing and Chert Dike Formation Triggered by Large Meteorite Impacts«, GSA Bulletin, Bd. 125, Ausgabe 5–6, S. 894–912, https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-abstract/125/5-6/894/125930/Crustal-fracturing-and-chert-dike-formation

70 Ruiz, J. (2011), »Giant Impacts and the Initiation of Plate Tectonics on Terrestrial Planets«, Planetary and Space Science, Bd. 59, Aus-gabe 8, S. 749–753,https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032063311000742

71 Solomatov, V. S. (2001), »The Role of Liquid Water in Maintaining Plate Tectonics and the Regulation of Surface Tempera-ture«, AGU Fall Meeting Abstracts, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001AGUFM.U21A..09S

72 Korenaga, J. (2011), »Thermal Evolution with a Hydrating Mantle and the Initiation of Plate Tectonics in the Early Earth«, Journal of Geophysical Research, Bd. 116, Ausgabe B12, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2011JB008410

73 Kirk, M. (2025), »Microbiology for Earth Scientists«, Sec 12.3 »Microbial influences on tectonic activity«, LibreTexts libraries https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Microbiology/Microbiology_for_Earth_

Scientists_(Kirk)/12%3A_Impacts_to_the_Lithosphere/12.03%3A_Microbial_influences_on_tectonic_activity

74 Die Namensgebung ist etwas umstritten: Meert, J. G. (2012), »What's in a Name? The Columbia (Paleopangaea/Nuna) Supercontinent«, Gondwana Research, Bd. 21, Ausgabe 4, S. 987–993, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X11003479 Es gab vielleicht auch noch andere Superkontinente: Rogers, J. J. W. (1996), »A History of Continents in the Past Three Billion Years«, The Journal of Geology, Bd. 104, Nr. 1, https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/629803 https://de.wikipedia.org/wiki/Superkontinent

75 https://de.wikipedia.org/wiki/Carbonat-Silicat-Zyklus https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffzyklus

76 Messling, N., Willbold, M., Kallas, L. et al. (2025): »Ru and W isotope systematics in ocean island basalts reveals core leakage«, *Nature* 642, S. 376–380, https://doi.org/10.1038/s41586-025-09003-0

77 Mining.com (2013), Fault Lines Lead to Gold, 14. Juni 2013, https://www.mining.com/web/fault-lines-lead-to-gold/

78 Selbst wenn kaum mehr flüssiges Wasser an der Oberfläche vorhanden war, so kann doch immer noch etwas Luftfeuchtigkeit in die Atmosphäre steigen, da auch Eis durch »Sublimation« direkt verdampfen kann.

79 University of Oxford (2023), »New Research Finds Ancient Carbon in Rocks Releases as Much Carbon Dioxide as the World's Volcanoes«, 4. Oktober 2023, https://www.ox.ac.uk/news/2023-10-04-new-research-finds-ancient-carbon-rocks-releases-much-carbon-dioxide-worlds

80 Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM), ein deutsch-französisch-spanisches Institut

81 Bei Wellenlängen kürzer als 200 nm; https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_absorption_by_water

82 Cowing, K. (2023), »The Oxygen Bottleneck for Technospheres«, Astrobiology, 3. August 2023, https://astrobiology.com/2023/08/the-oxygen-bottleneck-for-technospheres.html Kump, L. R. (2008), »The Rise of Atmospheric Oxygen«, *Nature*, Bd. 451, S. 277–278, https://www.nature.com/articles/nature06587 Allerdings suggeriert Vitali, R. et al. (2022), »Increased Fire Activity under High Atmospheric Oxygen Concentrations Is Compatible with the Presence of Forests«, Nature Communications, Bd. 13, Nr. 7285 (https://www.nature.com/articles/s41467-022-35081-z), dass auch etwas höhere Sauerstoffkonzentrationen möglich wären.

83 Vosseberg, J. et al. (2024), »The Emerging View on the Origin and Early Evolution of Eukaryotic Cells«, *Nature*, Bd. 633, S. 295–305, https://www.nature.com/articles/s41586-024-07677-6

84 »Origin of Eukaryotes«, TheOriginOfLife, YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=oW3DT18jxqI

85 Goodenoug, U. und J. Heitman (2014), »Origins of Eukaryotic Sexual

Reproduction«, Cold Spring Harbor Perspectives Biology, Bd. 6, Aus-gabe 3. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3949356/

86 Viscomi, C. und M. Zeviani (2019), »Breathe: Your Mitochondria Will Do the Rest… If They Are Healthy!«, Cell Metabolism, Bd. 30, Aus-gabe 4, S. 628–629, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1550413119305078

87 Siehe Cavalier-Smith, T. (1992), »The Origin, Losses and Gains of Chloroplasts«, in: in: Lewin, R. A. (Hg.), Origins of Plastids, New York, London: Chapman & Hall, S. 291–348, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-2818-0_15 Vielleicht beginnt dies auch schon viel früher, vor 1,8 Milliarden Jahren: Sánchez-Baracaldo et al. (2017), »Early Photosynthetic Eukary-otes Inhabited Low-Salinity Habitats«, PNAS, Bd. 114, Ausgabe 37, S. 9559–9564, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1620089114

88 Die EarthByte-Kollaboration hat diesen Tanz über die letzten Milliarden Jahre rekonstruiert und animiert: https://www.youtube.com/watch?v=gQqQhZp4uG8

89 https://de.wikipedia.org/wiki/Rodinia

90 Geology Bites, »Damian Nance on What Drives the Supercontinent Cycle«, https://geologybites.com/damian-nance

91 Geology Bites, »Rachel Wood on the Emergence of Complex Life in the Precambrian«, https://www.geologybites.com/rachel-wood Geology Bites, »Dietmar Müller on Reconstructing Plate Motions over a Billion Years of Earth History«, https://www.geologybites.com/dietmar-muller

92 https://en.wikipedia.org/wiki/Snowball_Earth Dutkiewicz, A. et al. (2024), »Duration of Sturtian ›Snowball Earth‹ Glaciation Linked to Exceptionally Low Mid-Ocean Ridge Out-gassing«, Geology, Bd. 52, Ausgabe 4, S. 292–296, https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/geology/article/52/4/292/633748/Duration-of-Sturtian-Snowball-Earth-glaciation Ye, Y. et al. (2024), »Exploring Climate Variability During the Mari-noan Glaciation: A Study of Black Shale Geochemistry«, Gondwana *Research*, Bd. 128, S. 315–324, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X23003210

93 Timmer, J. (2024), »The Earth Heated Up When Its Day Was 22 Hours Long«, Ars Technica, 3. Juli 2024, https://arstechnica.com/science/2024/07/the-earth-heated-up-when-its-day-was-22-hours-long/ Deitrick, R. und C. Goldblatt (2024), »Past Earth Warmed by Tidal Resonance-Induced Organization of Clouds Under a Shorter Day«, Nature Geoscience, Bd. 17, S. 675–682, https://www.nature.com/articles/s41561-024-01469-3

94 Randall, I. (2016), »Hyperactive Magnetic Field May Have Led to One of Earth's Major Extinctions«, *Science*, 10. Februar 2016, https://www.science.org/content/article/hyperactive-magnetic-field-may-have-led-one-earth-s-major-extinctions

95 Valich, L. (2024), »Did a Magnetic Field Collapse Trigger the Emergence of Animals?«, University of Rochester, 2. Mai 2024, https://www.rochester.edu/newscenter/ediacaran-fauna-magnetic-field-collapse-604132 Hunt, K. (2024), »Earth's Magnetic Field Near Collapse Boosted Evolution«, CNN, 7. Mai 2024, https://amp.cnn.com/cnn/2024/05/07/world/earth-magnetic-field-near-collapse-ediacaran-scn Huang, W. et al. (2024), »Near-Collapse of the Geomagnetic Field May Have Contributed to Atmospheric Oxygenation and Animal Radiation in the Ediacaran Period«, Communications Earth & Environments, Bd. 5, Nr. 207, https://www.nature.com/articles/s43247-024-01360-4

96 Experten reden von der Ediacara-Fauna, benannt nach ihrem Fundort, den Ediacara-Hügeln in Südaustralien. https://de.wikipedia.org/wiki/Ediacara-Fauna Droser, M. L. und J. G. Gehling (2015), »The Advent of Animals: The View from the Ediacaran«, PNAS, Bd. 112, Ausgabe 16, S. 4865–4870, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4413262/ Yang, C. et al. (2021), »The Tempo of Ediacaran Evolution«, *Science Advances*, Bd. 7, Ausgabe 45, https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.abi9643

97 Universität Bielefeld (2009), »Kalziumschwemme als Antrieb für kambrische Explosion?«, *scinexx*, 7. Oktober 2009, https://www.scinexx.de/news/geowissen/kalziumschwemme-als-antrieb-fuer-kambrische-explosion/

98 Nicht nur Kalzit wird als Skelett-/Schalenmaterial genutzt, sondern auch Apatit oder Chitin.

99 Genesis 1, 21 (Zürcher Bibel)

100 Der aufmerksame Leser wird sich fragen, wo denn der 4. Tag geblieben ist. In der Genesis entstehen genau in der Mitte der sieben Tage der Mond, die Sonne und die Sterne: Lichter, deren Aufgabe es ist, dem Leben die Zeit zu geben. Der irdische 24-Stunden-Tag entsteht in der Genesis erst mitten in der Schöpfung. Der 4. Tag ist also ein kosmisches Intermezzo in der Erzählung von der Entstehung des Lebens, das Sonne, Mond und Sterne von Göttern zu (großen) Lichtern degradiert.

101 Die ältesten Fossilien fliegender Fische wurden erst aus der Zeit vor rund 240 Millionen Jahren gefunden. Fliegende Dinosaurier, die dann zu unseren Vögeln werden, kommen erst einige Millionen Jahre später.

102 Martin-Jones, C. M. (2023), »How Life and Geology Worked Together to Forge Earth's Nutrient Rich Crust«, University of Cambridge, 9. Mai 2023, https://www.esc.cam.ac.uk/news/how-life-and-geology-worked-together-forge-earths-nutrient-rich-crust Der Astrobiologe Robert Hazen argumentiert sogar für eine Evolution der Mineralien, die zuerst durch die Entstehung des Sonnen-systems, dann durch die Tektonik und schließlich durch das Leben selber vorangetrieben wurde: Hazen, R. M. et al. (2008), »Mineral Evolution«, Carnegie Science, https://hazen.carnegiescience.edu/research/mineral-evolution

Hoofdstuk 6: De verovering van de continenten

1 Eine gute Entscheidung, meint mein Lektor, und empfiehlt zu diesem Thema den Dokumentarfilm »Bemerkungen über einen sterbenden Wald« des Filmers, Journalisten und Romanciers Horst Stern von 1997 (dort auch das Skript nachlesbar): https://franzjosefadrian.com/facher/nationalpark-bayerischer-wald/kritik/horst-stern-bemerkungen-wald/2/

2 Bodenhorizonte und Bodenprofil, Universität Münster, https://hypersoil.uni-muenster.de/0/04/06.htm

3 Encyclopaedia Britannica (2025), »Gondwana«, 18. April 2025, https://www.britannica.com/place/Gondwana-supercontinent https://de.wikipedia.org/wiki/Gondwana

4 https://en.wikipedia.org/wiki/Ordovician#Paleogeography_and_tectonics

5 Marcilly, C. M. et al. (2022), »Understanding the Early Paleozoic Carbon Cycle Balance and Climate Change from Modelling«, Earth and Planetary Science Letters, Bd. 594, 15. September 2022, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X22003533#fg0120 Cocks, L. R. M. und T. H. Torsvik (2021), »Ordovician Palaeo-geography and Climate Change«, Gondwana Research, Bd. 100, S. 53–72, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X20302756

6 Ehr, L. von, »Ordovizium«, Geowiki, https://geowiki.geo.lmu.de/wiki/Ordovizium#Klima https://de.wikipedia.org/wiki/Ordovizium

7 Mills, B. J. W. et al. (2023), »Evolution of Atmospheric O_2 through the Phanerozoic, Revisited«, Annual Review of Earth and Planetary *Sciences*, Bd. 51, S. 253–276, Fig. 5, https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-earth-032320-095425

8 https://en.m.wikipedia.org/wiki/Precambrian_body_plans

9 Wellmann, C. H. et al. (2022), »Terrestrialization in the Ordovician«, Geological Society, Special Publications, Bd. 532, S. 171–190, https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP532-2022-92 Servais, T. et al. (2019), »Revisiting the Great Ordovician Diversification of Land Plants: Recent Data and Perspectives«, Palaeo-geography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Bd. 534, 15. November 2019, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0031018219300409

10 Gibling, M. R., N. S. Davies (2012), »Palaeozoic Landscapes Shaped by Plant Evolution«, Nature Geoscience, Bd. 5, S. 99–105, https://www.nature.com/articles/ngeo1376

11 Lexikon der Geowissenschaften, »Braided River System«, *Spektrum*, https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/braided-river-system/2299

12 Geology Bites, »Neil Davies on the Greening of the Continents«, https://www.geologybites.com/neil-davies Ielpi, A. et al. (2022), »The Impact of Vegetation on Meandering Rivers«, Nature Reviews Earth

& Environment, Bd. 3, S. 165–178, https://www.nature.com/articles/s43017-021-00249-6

13 https://en.wikipedia.org/wiki/Late_Ordovician_mass_extinction Jin, S. et al. (2024), »Orbital and Millennial-Scale Cycles through the Hirnantian (Late Ordovician) in Southern China«, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Bd. 25, Ausgabe 1, 24. Januar 2024, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023GC011127

14 Das erste wird auch Ordovizisches Massenaussterben genannt, weil es im Zeitalter des Ordoviziums stattfand. Einige Wissenschaftler argumentieren, dass wir gerade im Zeitalter des sechsten Massen-aussterbens sind – ein Aussterben, das menschengemacht ist. https://en.wikipedia.org/wiki/Extinction_event Mann, M. E. (2023), Our Fragile Moment: How Lessons from Earth's Past Can Help Us Survive the Climate Crisis, New York: PublicAf-fairs, S. 47

15 Schmitz, B. et al. (2019), »An Extraterrestrial Trigger for the Mid-Ordovician Ice Age: Dust from the Breakup of the L-Chondrite Parent Body«, Science Advances, Bd. 5, Ausgabe 9, 18. September 2019, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax4184 Tomikins, A. G., E. L. Martin und P. A. Cawood (2024), »Evidence Suggesting that Earth Had a Ring in the Ordovician«, Earth and Planetary Science Letters, Bd. 646, 15. November 2024, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X24004230?via%3Dihub Oder sogar ein direkter Einschlag: Glikson, A. Y. (2023), »An Asteroid Impact Origin of the Hirnantian (End-Ordovician) Glaciation and Mass Extinction«, Gondwana Research, Bd. 118, S. 153–159, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X23000655

16 Schmitz, B. et al. (2019), »An Extraterrestrial Trigger for the Mid-Ordovician Ice Age: Dust from the Breakup of the L-Chondrite Parent Body«, Science Advances, Bd. 5, Ausgabe 9, 18. September 2019, https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aax4184

17 Genesis 1, 24 (Einheitsübersetzung)

18 Ortega, R. P. (2020), »This is the Oldest Scorpion Known to Science«, *Science*, 16. Januar 2020, https://www.science.org/content/article/oldest-scorpion-known-science Wendruff, A. J. et al. (2019), »A Silurian Ancestral Scorpion with Fossilised Internal Anatomy Illustrating a Pathway to Arachnid Terrestrialisation«, Scientific Reports, Bd. 10, Ausgabe 14, 18. Dezember 2019, https://www.nature.com/articles/s41598-019-56010-z Kortsha, M. (2020), »World's Oldest Bug is Fossil Millipede from Scotland«, The University of Texas at Austin, 27. Mai 2020, https://news.utexas.edu/2020/05/27/worlds-oldest-bug-is-fossil-millipede-from-scotland/

19 Engel, M. S. und D. A. Grimaldi (2004), »New Light Shed on the Oldest Insect«, *Nature*, Bd. 427, S. 627–630, https://www.nature.com/articles/nature02291

20 Bell, G. und A. O. Mooers (1997), »Size and Complexity among Multicellular Organisms«, Biological Journal of the Linnean Society, Bd. 60, Ausgabe 3, S. 345–363, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002440669690108X

21 Schultz, C. (2025), »Giant, Mysterious Spires Ruled the Earth long before Trees Did. What Exactly Are these Odd-Looking Fossils?«, Smithsonian Magazine, 21. Januar 2025, https://www.smithsonianmag.com/smart-news/long-before-trees-overtook-the-land-earth-was-covered-by-giant-mushrooms-13709647/?no-ist=

22 MacPherson, C. (2019), »Analyzing the World's Oldest Woody Plant Fossil«, Canadian Light Source, 28. August 2019, https://www.lightsource.ca/public/news/2019-20-q2-jul-sep/analyzing-the-worlds-oldest-woody-plant-fossil.php Strullu-Derrien, C. et al. (2014), »The Earliest Wood and Its Hydraulic Properties Documented in c. 407-Million-Year-Old Fossils Using Synchrotron Microtomography«, Botanical Journal of the Linnean Society, Bd. 175, Ausgabe 3, S. 423–437, https://academic.oup.com/botlinnean/article-abstract/175/3/423/2416393?redirectedFrom=fulltext

23 Holland, M. (2025), »LignoSat: Erster Satellit aus Holz ins All entlassen«, heise online, 10. Januar 2025, https://www.heise.de/news/LignoSat-Erster-Satellit-aus-Holz-ins-All-entlassen-10236001.html

24 Cardiff University (2024), »Earth's Earliest Forest Revealed in Somerset Fossils«, phys.org, 7. März 2024, https://phys.org/news/2024-03-earth-earliest-forest-revealed-somerset.html

25 Berkeley, University of California, »The Devonian Period«, https://ucmp.berkeley.edu/devonian/devonian.php

26 Wang, D. et al. (2019), »The Most Extensive Devonian Fossil Forest with Small Lycopsid Trees Bearing the Earliest Stigmarian Roots«, Current Biology, Bd. 29, Ausgabe 16, S. 2604–2615, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982219307808 Gess, R. W. und C. Berry (2024), »Archaeopteris Trees at High Southern Latitudes in the Late Devonian«, Review of Palaeobotany and Palynology, Bd. 331, Dezember 2024, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034666724001635

27 Nach dem Kellwassertal im Oberharz, in dem der Geologe und Botaniker Friedrich Adolph Roemer 1850 den ersten Hinweis auf das Massenaussterben entdeckte. Tatsächlich gab es nicht nur ein einziges Ereignis, sondern mehrere Pulse von Massenaussterben.

28 Vleeschouwer, D. D. et al. (2013), »The Astronomical Rhythm of Late-Devonian Climate Change (Kowala Section, Holy Cross Mountains, Poland)«, Earth and Planetary Science Letters, Bd. 365, S. 25–37, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X13000241?-via%3Dihub

29 Fields, A. L. et al. (2020), »Supernova Triggers for End-Devonian Extinctions«, PNAS, August 2020, doi:10.1073/pnas.2013774117

30 Vielleicht auch einige Millionen Jahre früher: Niedźwiedzki, G. et al. (2010), »Tetrapod Trackways from the Early Middle Devonian Period of Poland«, *Nature*, Bd. 463, S. 43–48, https://www.nature.com/articles/nature08623

31 https://de.wikipedia.org/wiki/Acanthostega

32 Cupello, C. et al. (2022), »Lung Evolution in Vertebrates and the Water-to-Land Transition«, eLife, Juli 2022, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9323002/

33 Benton, M. J. (Hg.) (2020): Cowen's History of Life, 6. Aufl., Chichester: Wiley-Blackwell, S. 126

34 Auch Permokarbonische Vereisung genannt, eines der sieben bekannten Eiszeitalter der Erdgeschichte: https://de.wikipedia.org/wiki/Permokarbonische_Vereisung

35 Central Pangean Mountains; https://en.wikipedia.org/wiki/Central_Pangean_Mountains

36 Smithsonian Environmental Research Center, »The Age of Oxygen (400 Million to 290 Million Years Ago)«, https://forces.si.edu/atmosphere/02_02_06.html

37 Scott, A. C. und T. P. Jones (1994), »The Nature and Influence of Fire in Carboniferous Ecosystems«, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, Bd. 106, Ausgabe 1–4, S. 91–112, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0031018294900051 Vitali, R. et al. (2022), »Increased Fire Activity under High Atmospheric Oxygen Concentrations Is Compatible with the Presence of Forests«, Nature Communications, Bd. 13, Nr. 7285, 26. November 2022, https://www.nature.com/articles/s41467-022-35081-z

38 Ehr, L. v., »Karbon«, Geowiki, https://geowiki.geo.lmu.de/wiki/Karbon#Klima

39 Dies ändert sich in Deutschland aber zunehmend. Der Strommix wird immer sauberer: Fraunhofer ISE (2025), »Öffentliche Stromerzeugung 2024: Deutscher Strommix so sauber wie nie«, 2. Januar 2025, Presseinformation, https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2025/oeffentliche-stromerzeugung-2024-deutscher-strommix-so-sauber-wie-nie.html

40 Sibirien kam erst im Perm dazu, und zahlreiche Teile des heutigen Chinas waren ebenfalls noch nicht dabei; Scotese, C. R., »The Late Carboniferous: A Time of Great Coal Swamps«, http://www.scotese.com/late.htm

41 https://de.wikipedia.org/wiki/Variszische_Orogenese# https://en.wikipedia.org/wiki/Central_Pangean_Mountains

42 Wilson, R. W. et al. (2019), »Fifty Years of the Wilson Cycle Concept in Plate Tectonics: an Overview«, Geological Society, London, Special Publications, Bd. 470, S. 1–17, https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/sp470-2019-58

43 Podcast »The Backpacker's Guide to Prehistory«, Staffel 2, Folge 1: The Carboniferous, https://open.spotify.com/episode/45cXaD1uNzQD8hzkIrU7NJ

44 Encyclopaedia Britannica (2025), »Pangea«, 29. März 2025, https://www.britannica.com/place/Pangea

45 Maynard, J. R. und M. R. Leeder (1992), »On the Periodicity and Ma-gnitude of Late Carboniferous Glacioeustatie Sea-Level Changes«, Journal of the Geological Society, Bd. 149, S. 303–311, https://www.lyell-collection.org/doi/abs/10.1144/gsjgs.149.3.0303

46 Knecht, R. J., M. S. Engel und J. S. Benner (2011), »Late Carboniferous Paleoichnology Reveals the Oldest Full-Body Impression of a Flying Insect«, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1015948108

47 Askham, B., »Griffinflies: The Earliest Flying Insects«, Natural History Museum, https://www.nhm.ac.uk/discover/giant-dragonflies. html Ashworth, J. (2021), »The World's Largest Terrestrial Arthropod Was a Car-Sized Millipede«, Natural History Museum, 21. Dezember 2021, https://www.nhm.ac.uk/discover/news/2021/december/worlds-largest-terrestrial-arthropod-was-car-sized-millipede.html

48 Science Daily (2010), »Raising Giant Insects to Unravel Ancient Oxygen«, Geological Society of America, 30. Oktober 2010, https://www.sciencedaily.com/releases/2010/10/101029132924.htm

49 Sphenopteris, eine Formgattung der Belaubung farnartiger Pflanzen

50 https://de.wikipedia.org/wiki/Planetarische_Zirkulation »Why and How Do Planets Rotate?«, Scientific American, 13. April 2003, https://www.scientificamerican.com/article/why-and-how-do-planets-ro/ Ein Video, das die Rotation der Planeten zeigt, findet sich in dem Beitrag Mosher, D. (2008), »Venus Mysteries Blamed on Colossal Collision«, *Space*, 28. Februar 2008. Nur Venus und Uranus drehen anders, was wahrscheinlich mit Kollisionen zu tun hat. https://www.space.com/5025-venus-mysteries-blamed-colossal-collision.html Dewhirst, D. W. (1987), »The Reversal of the Spin of Venus«, Journal of the British Astronomical Association, Bd. 98, Ausgabe 3, S. 23–25, https://articles.adsabs.harvard.edu//full/1987JBAA...98... 23D/0000023.000.html Planets of the Solar System, APOD Videos, https://www.youtube.com/watch?v=my1euFQHH-0

51 https://de.wikipedia.org/wiki/Zechsteinmeer

52 https://de.wikipedia.org/wiki/Synapsiden

53 Heute meistens gleichwarme oder endotherme Tiere genannt. Der Aufstieg der Warmblüter begann im Perm und beschleunigte sich dann im Trias. Benton, M. J. (2021), »The Origin of Endothermy in Synapsids and Archosaurs and Arms Races in the Triassic«, Gondwana Research, Bd. 100, S. 261–289, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1342937X20302252

54 Ivanov, A. V. (2013), »Siberian Traps Large Igneous Province«, Earth-

Science Reviews, Bd. 122, S. 58–76, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012825213000652 https://de.wikipedia.org/wiki/Sibirischer_Trapp

55 Vaidyanathan, G. (2011), »Coal-Fired Trigger of Mass Extinction«, *Nature*, Bd. 465, https://www.nature.com/articles/news.2011.38

56 https://de.wikipedia.org/wiki/Vulkanischer_Winter

57 Zum Glück ist die Freisetzung solcher Stoffe heute weitestgehend verboten, womit ein neuerliches Aufreißen des Ozonloches auf der Erde verhindert werden konnte. https://www.bmuv.de/themen/luft/ozonschicht-ozonloch/kurzinfo-schutz-der-ozonschicht

58 Starbird, K. (2019), »How Halogens Caused the End-Permian Extinction«, Yale Scientific, 24. März 2019, https://www.yalescientific.org/2019/03/how-halogens-caused-the-end-permian-extinction/

59 Frühere Schätzungen gingen sogar von 90% – 96% der Arten aus, aber das war vielleicht übertrieben: Stanley, S. M. (2016), »Estimates of the Magnitudes of Major Marine Mass Extinctions in Earth History«, Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 113, Nr. 42, 3. Oktober 2016, https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1613094113 Encyclopaedia Britannica (2025), »Permian Extinction«, 13. April 2025, https://www.britannica.com/science/Permian-extinction

60 Jones, A. P. et al. (2002), »Impact Induced Melting and the Development of Large Igneous Provinces«, Earth and Planetary *Science Letters*, Bd. 202, Ausgabe 3–4, S. 551–561, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X02008245 Abe, S. (2004), »Did an Impact Trigger the Permian-Triassic Extinction?«, Astrobiology at NASA, 17. Mai 2004, https://astrobiology.nasa.gov/news/did-an-impact-trigger-the-permian-triassic-extinction/

61 The University of Western Australia (2013), »Biggest Extincion in History Caused by Climate-Changing Meteor«, 31. Juli 2013, https://www.news.uwa.edu.au/archive/201307315921/international/biggest-extinction-history-caused-climate-changing-meteor/ Tohver, E. et. al. (2012), »Geochronological Constraints on the Age of a Permo–Triassic Impact Event: U–Pb and 40Ar/39Ar Results for the 40 km Araguainha Structure of Central Brazil«, Geochimica et Cosmochimica Acta, Bd. 86, S. 214–227, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703712001457 Lana, C. und Y. Marangoni (2009), »The Araguainha: a South American Permo-Triassic Catastrophic Event«, GeologyToday, 23. Januar 2009, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2451.2009.00701.x

62 Durch Friedrich August von Alberti, https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich_August_von_Alberti

63 Carnian pluvial episode, auch Raibl-Ereignis oder Reingrabener Wende genannt

64 Abreu, K. D. (2024), »Unraveling the Mystery of the Late Triassic's

Two-Million-Year Rainy Season«, Explorersweb, 28. März 2024, https://explorersweb.com/two-million-year-rainy-season

65 Benton, M. J., M. Bernardi und C. Kinsella (2018), »The Carnian Pluvial Episode and the Origin of Dinosaurs«, Journal of the Geological Society, Bd. 175, S. 1019–1026, https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/jgs2018-049

66 Podcast »The Backpacker's Guide to Prehistory«, S1E5 – The Triassic, https://www.prehistoryguide.co.uk und https://open.spotify.com/episode/otPY5Rrix5OnoXFdi1HY6v

67 Cincotta, A. et al. (2022), »Pterosaur Discovery Solves Ancient Feather Mystery«, *Nature*, Bd. 604, S. 684–689, https://www.nature.com/articles/s41586-022-04622-3

68 Zentralatlantische Magmatische Provinz genannt, https://de.wikipedia.org/wiki/Zentralatlantische_Magmatische_Provinz

69 https://en.wikipedia.org/wiki/Triassic–Jurassic_extinction_event& Podcast »The Backpacker's Guide to Prehistory«, S1E5 – The Triassic, https://open.spotify.com/episode/otPY5Rrix5OnoXFdi1HY6v

70 Tanner, L. H. (2024), »Wastes of Time – Faeces and Vomit Track how Dinosaurs Rose to Prominence«, *Nature*, 27. November 2024, https://www.nature.com/articles/d41586-024-03652-3

71 Mao, F. et al. (2024), »Fossils Document Evolutionary Changes of Jaw Joint to Mammalian Middle Ear«, *Nature*, Bd. 628, S. 576–581, https://www.nature.com/articles/s41586-024-07235-0

72 Podcast »The Backpacker's Guide to Prehistory«, S2E6 – Jurassic, https://open.spotify.com/episode/4gy9UaXDR4kfA2rgcIpk7x

73 Bernhard, E. (2020), »Wie Blütenpflanzen die Welt eroberten«, wissenschaft.de, 14. Dezember 2020, https://www.wissenschaft.de/erde-umwelt/wie-bluetenpflanzen-die-welt-eroberten/

74 Bedecktsamer, auch Angiospermen genannt, https://de.wikipedia.org/wiki/Bedecktsamer

75 Podcast »Likeville« (2020), »How Wheat Domesticated Us: A Selection from Yuval Noah Harari's Sapiens«, 24. Februar 2020, https://www.likevillepodcast.com/articles/2020/2/24/how-wheat-domesticated-us-a-selection-from-yuval-noah-hararis-sapiens-2018

76 Dinodata, »Mesozoikum/Das Zeitalter der Kreide«, https://dinodata.de/mesozoikum/kreidezeit.php Barrón, E. et al. (2017), »The Fossil History of Quercus«, in: Gil-Pelegrín, E. et al. (Hg.), Oaks Physiological Ecology. Exploring the Functional Diversity of Genus Quercus L., Tree Physiology, Bd. 7, Cham: Springer, S. 39–105, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-69099-5_3 Gao, J. et al. (2020), »Historical Biogeography of Acer L.: Genetic Evidence for Out-of-Asia Hypothesis with Multiple Dispersals to North America and Europe«, Scientific Reports, Bd. 10, Nr. 21178, https://www.nature.com/articles/s41598-020-78145-0

77 Hood, L. (2013), »Blooming Flowers Rang the Death Knell for Many Mammals«, The Conversation, 25. Oktober 2013, https://theconversation.com/blooming-flowers-rang-the-death-knell-for-many-mammals-19222

78 Condamine, F. L. et al. (2021), »Dinosaur Biodiversity Declined Well Before the Asteroid Impact«, Nature Communications, Bd. 12, Nr. 3833, 29. Juni 2021, https://www.nature.com/articles/s41467-021-23754-0 Es gibt aber auch Gegenmeinungen, wonach die Dinosaurier sich bis zum Schluss gut entwickelt haben: Bonsor, J. A. et al. (2020), »Dinosaur Diversification Rates Were not in Decline Prior to the K-Pg Boundary«, Royal Society Open Science, 18. Oktober 2020, https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsos.201195

79 Tamisiea, J. (2023), »Mammals Preyed on Much Larger Dinosaurs: A Stunning New Fossil Reveals«, Scientific American, 14. Juli 2023, https://www.scientificamerican.com/article/mammals-preyed-on-much-larger-dinosaurs-a-stunning-new-fossil-reveals/ Repenomamus – allerdings schon seit 125 Millionen Jahren

80 Fischer-Gödde, M. et al. (2024), »Ruthenium Isotopes Show the Chicxulub Impactor Was a Carbonaceous-Type Asteroid«, *Science*, Bd. 385, Nr. 6710, S. 752–756, https://www.science.org/doi/10.1126/science.adk4868

81 Collins, G. S. et al. (2020), »A Steeply-Inclined Trajectory for the Chicxulub Impact«, *Nature* Communications, Bd. 11, Nr. 1480, 26. Mai 2020, https://www.nature.com/articles/s41467-020-15269-x

82 During, M. A. D. et al. (2022), »The Mesozoic Terminated in Boreal Spring«, *Nature*, Bd. 603, S. 91–94, https://www.nature.com/articles/s41586-022-04446-1

83 Range, M. M. et al. (2022), »The Chicxulub Impact Produced a Powerful Global Tsunami«, AGU Advances, 4. Oktober 2022, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021AV000627

84 Geological Society of America (2022), »Impact that Killed the Dinosaurs May Have Triggered a ›Mega-Earthquake‹ that Lasted Weeks to Months«, phys.org, 6. Oktober 2022, https://phys.org/news/2022-10-impact-dinosaurs-triggered-mega-earthquake-weeks.html

85 In dem Staub, der sich auf der ganzen Erde ablagerte, befand sich auch eine hohe Konzentration des Elements Iridium, das in Asteroiden reichhaltig, auf der Erde aber nur selten vorkommt. Dadurch fand der Physiknobelpreisträger Luis Walter Alvarez zusammen mit seinem Sohn, dem Geologen Walter Alvarez, und anderen Kollegen die ersten überzeugenden Hinweise auf den Einschlag. Die Ergebnisse in diesem Abschnitt stammen größtenteils von der Fundstelle »Tanis«, die in privatem Besitz ist und nur von wenigen Experten besucht wurde. Einer davon ist Jan Smit, mit dem ich persönlich Kontakt hatte und dem ich für wertvolle zusätzliche Hintergrundinformationen dankbar bin. Mehr

öffentliche Informationen findet man im exzellenten Podcast Geology Bites von Oliver Strimpel, »Jan Smit on Resolving a Single Hour of the Cataclysm 66 Million Years Ago«, https://www.geologybites.com/jan-smit.

86 During, M. A. D. et al. (2022), »The Mesozoic Terminated in Boreal Spring«, *Nature*, Bd. 603, S. 91–94, https://www.nature.com/articles/s41586-022-04446-1

87 CORDIS (2016), »Trending Science: Southern Hemisphere Recovered Quicker from Devastating Asteroid Strike«, 10. November 2016, https://cordis.europa.eu/article/id/120587-trending-science-southern-hemisphere-recovered-quicker-from-devastating-asteroid-strike

88 Henriques, M. (2022), »How Mammals Won the Dinosaurs' World«, BBC, 15. August 2022, https://www.bbc.com/future/article/20220812-dinosaur-extinction-why-did-mammals-survive

89 Dambeck, T. (2019), »Der rasante Aufstieg der Säugetiere«, Spiegel Online, 24. Oktober 2019, https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/fossilienfunde-der-rasante-aufstieg-der-saeugetiere-a-1293190.html Lyson, T. R. et al. (2019), »Exceptional Continental Record of Biotic Recovery After the Cretaceous-Paleogene Mass Extinction«, *Science*, Bd. 366, Nr. 6468, S. 977–982, https://www.science.org/doi/10.1126/science.aay2268

90 Pittalwala, I. (2014), »When Birds Lost Their Teeth«, University of California, 11. Dezember 2014, https://www.universityofcalifornia.edu/news/when-birds-lost-their-teeth

91 https://en.wikipedia.org/wiki/Deccan_Traps

92 Neilson, H. R. und H. Blinn (2021), »The Curious Case of the North Star: the Continuing Tension between Evolution Models and Measurements of Polaris«, in: *RR* Lyrae/Cepheid 2019: Frontiers of Classical Pulsators, hg. Kinemuchi, K. et al. (ASP Conference Series, Bd. 529), San Francisco: Astronomical Society of the Pacific,S. 72, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021ASPC..529...72N Mit einem geschätzten Alter von 45–67 Millionen Jahren.

93 Podcast »The Backpackers Guide to Pre History«, S2E3 – The Palaeogene, https://open.spotify.com/episode/1UNpJbFzxJchI2fHNPA7sf

94 Herrera, F. et al. (2024), »Cenozoic Seeds of Vitaceae Reveal a Deep History of Extinction and Dispersal in the Neotropics«, *Nature* Plants, Bd. 10, S. 1091–1099, https://www.nature.com/articles/s41477-024-01717-9

95 Vgl. Kapitel 5 von Mann, M. (2023), Our Fragile Moment. How Lessons from Earth's Past Can Help Us Survive the Climate Crisis, New York: PublicAffairs

96 Foster, L. C. et al. (2013), »Surviving Rapid Climate Change in the Deep Sea during the Paleogene Hyperthermals«, Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 110, S. 5592–5596, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1300579110

97 Meissner, K. J. et al. (2014), »The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: How Much Carbon Is Enough?«, Paleoceanography and Paleoclimatology, Bd. 29, Nr. 10, S. 946–963, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014PA002650

98 Inglis, G. N. et al. (2020), »Global Mean Surface Temperature and Climate Sensitivity of the Early Eocene Climatic Optimum (EECO), Paleocene – Eocene Thermal Maximum (PETM), and Latest Paleocene«, Climate of the Past, Bd. 16, Ausgabe 5, S. 1953–1968, https://cp.copernicus.org/articles/16/1953/2020/

99 Wighton, K. (2016), »Dutch Men and Latvian Women Tallest in World According to 100-Year Height Study«, Imperial News, 26. Juli 2016, https://www.imperial.ac.uk/news/173634/dutch-latvian-women-tallest-world-according/ Natürlich spielen auch Ernährung und Gesundheitsversorgung eine Rolle bei der Größe. Insgesamt hat die mittlere Größe von Erwachsenen in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Inzwischen schrumpft sie in einigen Ländern auch wieder.

100 Hiller, M. et al. (2019), »Weniger ist mehr: Genverluste für ein neues Leben im Wasser«, Max-Planck-Gesellschaft, 25. September 2019, https://www.mpg.de/13913934/0923-mozg-112489-weniger-ist-mehr-genverluste-fuer-ein-neues-leben-im-wasser

101 Podcast »Geology Bites«, »Mike Searle on Why Mountains Exist«, https://www.geologybites.com/mikesearle

102 Sarkar, S. et al. (2019), »Late Eocene Onset of the Proto-Antarctic Circumpolar Current«, Scientific Reports, Bd. 9, Nr. 10125, 12. Juli 2019, https://www.nature.com/articles/s41598-019-46253-1

103 Liu, Z. et al. (2009), »Global Cooling During the Eocene-Oligocene Climate Transition«, *Science*, Bd. 323, Nr. 5918, S. 1187–1190, https://www.science.org/doi/10.1126/science.1166368

104 Podcast »The Backpacker's Guide To Prehistory«, S2E4: The Neo-gene, https://www.prehistoryguide.co.uk oder https://open.spotify.com/episode/1bKmrKJu4brLXtIVuNTMFA

105 https://de.m.wikipedia.org/wiki/C4-Pflanze

106 Gilbert, C., K. D. Pugh und J. G. Fleagle (2020), »Dispersal of Miocene Hominoids (and Pliopithecoids) from Africa to Eurasia in Light of Changing Tectonics and Climate«, Biological Consequences of Plate Tectonics, 24. November 2020, S. 393–412, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-49753-8_17

107 Die Vallesium-Krise vor 9,6 Millionen Jahren: Agusti, J., A. Sanz de Siria und M. Garcés (2003), »Explaining the End of the Hominoid Experiment in Europe«, Journal of Human Evolution, Bd. 45, Ausgabe 2, S. 145–153, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0047248403000915

108 Reid, M. J. und A. Brunthaler (2020), »The Proper Motion of Sagittarius A*. III. The Case for a Supermassive Black Hole«, The Astrophysical

Journal, Bd. 892, Art.-Nr. 39, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ApJ...892...39R Reid, M. J. et al. (2019), »Trigonometric Parallaxes of High-mass Star-forming Regions: Our View of the Milky Way«, The Astrophysical Journal, Bd. 885, Art.-Nr. 131, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019ApJ...885..131R

109 Opher, M. et al. (2024), »A Possible Direct Exposure of the Earth to the Cold Dense Interstellar Medium 2–3 Myr Ago«, Nature Astronomy, Bd. 8, S. 983–990, https://www.nature.com/articles/s41550-024-02279-8 Miller, J. A. et al. (2024), »Earth's Mesosphere during Possible Encounters with Massive Interstellar Clouds 2 and 7 Million Years ago«, Geophysical Research Letters, Bd. 51, Nr. 17, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2024GL110174

110 Center for Astrophysics (2022), »1,000-Light-Year Wide Bubble Surrounding Earth is Source of All Nearby, Young Stars«, 1. Dezember 2022, https://www.cfa.harvard.edu/news/1000-light-year-wide-bubble-surrounding-earth-source-all-nearby-young-stars

111 Zwar rotieren die Local Bubble und die Sonne gemeinsam um das Zentrum der Milchstraße, aber beide haben auch ihre Eigenbewegungen, so wie Schlittschuhläufer beim Rennen auf der Eisbahn relativ zueinander unterschiedlich schnell laufen. Die Sonne braucht so noch 10–20 Millionen Jahre, um die Local Bubble zu verlassen. Sutter, P. (2024), »The Local Bubble: How Our Solar System Got Caught Up in a Cosmic Crime Scene«, Space.com, 27. August 2024, https://www.space.com/what-is-local-bubble-solar-system

112 Fields, B. D. et al. (2023), »Deep-Sea and Lunar Radioisotopes from Nearby Astrophysical Explosions«, Annual Review of Nuclear and Particle Science, Bd. 73, S. 365–395, https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-nucl-011823-045541#right-ref-B21

113 Krijgsman, W. et al. (2024), »Causes and Consequences of the Messinian Salinity Crisis«, Nature Reviews Earth & Environment, Bd. 5, Ausgabe 5, S. 335–350, https://www.nature.com/articles/s43017-024-00533-1

114 Hall, J. R. (2023), »Timing and Consequences of Bering Strait Opening: New Insights from 40Ar/39Ar Dating of the Barmur Group (Tjörnes Beds), Northern Iceland«, Paleoceanography and Paleocli-matology, Bd. 38, Nr. 4, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022PA004539

115 De Schepper, S. et al. (2015), »Early Pliocene Onset of Modern Nordic Seas Circulation Related to Ocean Gateway Changes«, *Nature* Communications, Bd. 6, Nr. 8659, 28. Oktober 2015, https://www.nature.com/articles/ncomms9659

116 Kanapaux, B. (2009), »Uncovering the Ancient Origins of Modern Opossum«, Florida Museum of Natural History, 15. Dezember 2009, https://www.floridamuseum.ufl.edu/science/uncovering-the-ancient-origins-of-modern-opossum/

117 Channell, J. E. T. und L. Vigliotti (2019), »The Role of Geomagnetic Field Intensity in Late Quaternary Evolution of Humans and Large Mammals«, Reviews of Geophysics, Bd. 57, Ausgabe 3, S. 709–738, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018rg000629

118 Channell, J. E. T. und L. Vigliotti (2019), »The Role of Geomagnetic Field Intensity in Late Quaternary Evolution of Humans and Large Mammals«, Reviews of Geophysics, Bd. 57, Ausgabe 3, S. 709–738, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018RG 000629

119 Neuhäuser, R., F. Gießler und V. V. Hambaryano (2020), »A Nearby Recent Supernova that Ejected the Runaway Star ζ Oph, the Pulsar PSR B1706–16, and 60Fe Found on Earth«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 498, Ausgabe 1, S. 899–917, https://academic.oup.com/mnras/article/498/1/899/5572681

120 Wu, S. et al. (2021), »Characteristics of Milankovitch Cycles Recorded in Eocene Strata in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin, North China«, China Geology, Bd. 4, Ausgabe 2, S. 274–287, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096519221000586

121 Heute leben aber fast 90 Prozent der Weltbevölkerung auf der Nordhalbkugel.

122 Watanabe, Y. et al. (2023), »Astronomical Forcing Shaped the Timing of Early Pleistocene Glacial Cycles«, Communications Earth & Environment, Bd. 4, Nr. 113, 15. Mai 2023, https://www.nature.com/articles/s43247-023-00765-x

123 National Institutes of Natural Sciences (2023), »Cosmic Clockwork: The Outer Space Origin of Ice Age Cycles«, SciTechDaily, 16. Mai 2023, https://scitechdaily.com/cosmic-clockwork-the-outer-space-origin-of-ice-age-cycles/ Watanabe, Y. et al. (2023), »Astronomical Forcing Shaped the Timing of Early Pleistocene Glacial Cycles«, Communications Earth & Environment, Bd. 4, Nr. 113. https://www.nature.com/articles/s43247-023-00765-x

124 Chalk, T. B. et al. (2017), »Interglacials of the 41 ka-world and the Mid-Pleistocene Transition«, Past Global Changes Magazine, Bd. 25, Ausgabe 3, https://pastglobalchanges.org/publications/pages-magazines/pages-magazine/11517

125 Strom, M. (2024), »Mars Attracts: How Earth's Interactions with the Red Planet Drive Deep-Sea Circulation«, The University of Sydney, 12. März 2024, https://www.sydney.edu.au/news-opinion/news/2024/03/12/mars-attracts-earth-interaction-red-planet-drives-deep-sea-circulation.html

126 Morton, M. C. (2020), »When Did Archaic Humans Control Fire?«, Eos, 15. Dezember 2020, https://eos.org/articles/when-did-archaic-humans-control-fire

127 Genesis 1, 26–27 (Lutherbibel)

128 Im Umkehrschluss kann man dann eigentlich davon ausgehen, dass

Gott Mann und Frau zugleich ist – zumindest wenn man die Bibel wörtlich nimmt.

Hoofdstuk 7: De eerste mens

1 Carstens, P. (2021), »Krähen wissen, was ihr Werkzeug wert ist«, Geo, 29. Dezember 2021, https://www.geo.de/natur/tierwelt/kraehen-wissen--was-ihr-werkzeug-wert-ist-31449318.html
2 Balzan Stiftung, Verleihung der Balzan Preise 2023 in Bern, https://www.balzan.org/de/aktualisierung/verleihung-der-balzan-preise-2023-in-bern
3 Almécija, S. et al. (2021), »Fossil Apes and Human Evolution«, *Science*, Bd. 372, Nr. 6546, https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.abb4363#con1
4 Cerling, T. E. et al. (1997), »Global Vegetation Change through the Miocene/Pliocene Boundary«, *Nature*, Bd. 389, S. 153–158, https://www.nature.com/articles/38229
5 Böhme, M. et al. (2019), »A New Miocene Ape and Locomotion in the Ancestor of Great Apes and Humans«, *Nature*, Bd. 575, S. 489–493, https://www.nature.com/articles/s41586-019-1731-0
6 Schrenk, F. (2024): »Wann ist ein Mensch ein Mensch?«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/evolution-wann-ist-ein-mensch-ein-mensch-a-decof77d-cebb-4boe-aeb6-7164a6bf6b1e Die offizielle Bezeichnung ist Paranthropus boisei. Die Bezeichnung »Nussknackermenschen« ist nicht ganz unumstritten. Untersuchungen des Zahnabriebs legen nahe, dass diese Menschenart vielleicht nur in Ausnahmefällen übermäßig zähe Nahrung zu sich genommen hat, siehe Ungar, P. S., F. E. Grine und M. F. Teaford (2008), »Dental Microwear and Diet of the Plio-Pleistocene Hominin Paranthropus Boisei«, PLOS ONE, 30. April 2008, https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0002044
7 Dominguez-Rodigo, M. et al. (2013), »First Partial Skeleton of a 1.34-Million-Year-Old Paranthropus boisei from Bed II, Olduvai Gorge, Tanzania«, PLOS ONE, 5. Dezember 2013, https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0080347
8 Padian, K. (2022), »Why Tyrannosaurid Forelimbs Were so Short: An Integrative Hypothesis«, Acta Palaeontologica Polonica, Bd. 67, Aus-gabe 1, S. 63–76, https://www.app.pan.pl/article/item/app009212021.html
9 Tacail, T. et al. (2019), »Calcium Isotopic Patterns in Enamel Reflect Different Nursing Behaviors among South African Early Hominins«, Science Advances, Bd. 5, Nr. 8, 28. August 2029, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax3250
10 Institute for Policy Research (2019), »The Brain Consumes Half of a

Child's Energy – and that Could Matter for Weight Gain«, Northwestern, 17. Juni 2019, https://www.ipr.northwestern.edu/news/2019/kuzawa_brain_energy.html

11 Hublin, J.-J. (2024), La tyrannie du cerveau, Paris: Robert Laffont, https://www.chasse-aux-livres.fr/prix/2221276361/la-tyrannie-du-cerveau-jean-jacques-hublin

12 Schlak, M. (2024), »Austern für die Affen«, Der Spiegel, Bd. 9/2024, https://www.spiegel.de/wissenschaft/primatenforschung-wie-makaken-steinwerkzeuge-verwenden-a-ddf8c172-6694-4dde-b311-3e945cdf11d3

13 https://de.wikipedia.org/wiki/Hominini

14 https://de.wikipedia.org/wiki/Stammesgeschichte_des_Menschen Messer, A. E. (2015), »Earliest Known Fossil of the Genus Homo Dates to 2.8 to 2.75 Million Years ago«, Penn State University, 4. März 2015, https://www.psu.edu/news/research/story/earliest-known-fossil-genus-homo-dates-28-275-million-years-ago

15 Das sogenannte Kind von Kromdraai, siehe Braga, J. et al. (2023), »Hominin Fossils from Kromdraai and Drimolen Inform Paranthropus Robustus Craniofacial Ontogeny«, Science Advances, Bd. 9, Nr. 18, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ade7165

16 Carotenuto, F. et al. (2016), »Venturing out Safely: The Biogeography of Homo Erectus Dispersal out of Africa«, Journal of Human Evolution, Bd. 95, S. 1–12, https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0047248416000294

17 Rizal, Y. et al. (2020), »Last Appearance of Homo Erectus at Ngandong, Java, 117 000–108 000 Years ago«, *Nature*, Bd. 577, S. 381–385, https://www.nature.com/articles/s41586-019-1863-2

18 Es gibt aber bis jetzt keinen Hinweis für ein Zusammenleben, siehe Smithsonian Insider, »Scientists Show that Modern Humans never Co-Existed with Homo Erectus«, 6. Juli 2011, https://insider.si.edu/2011/07/scientists-show-that-modern-humans-never-co-existed-with-homo-erectus/

19 Franz. A. (2024), »Abenteurer mit Handwerkstalent«, Spiegel *Geschichte*, Nr. 2/2024, S. 39

20 Bryner, A. (2024), »What Does the ›Hobbit‹ Fossil Discovery Teach Us about Our Tiny Human Relatives?«, Scientific American, 7.8.2024, https://www.scientificamerican.com/article/new-hobbit-fossil-clarifies-origin-story-of-this-tiny-human-relative/ Smithsonian National Museum of Natural History, »Homo floresiensis«, https://humanorigins.si.edu/evidence/human-fossils/species/homo-floresiensis

21 Ries, G. (2019), »Die Ersten Waffen der Menschheit: Ein Besuch im Paläon«, SciLogs Spektrum, 27. Januar 2019, https://scilogs.spektrum.de/mente-et-malleo/die-ersten-waffen-der-menscheit-ein-besuch-im-palaeon/

22 Durvasula, A. und S. Sankararaman (2020), »Recovering Signals of Ghost Archaic Introgression in African Populations«, *Science* Advances, Bd. 6, Nr. 7, 12. Februar 2020, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax5097

23 Dorey, F. (2021), »Homo neanderthalensis – The Neanderthals«, Australian Museum, 28. Juni 2021, https://australian.museum/learn/science/human-evolution/homo-neanderthalensis/

24 https://de.wikipedia.org/wiki/Richard_Leakey

25 Mounier, A. und M. Mirazón Lahr (2019), »Deciphering African Late Middle Pleistocene Hominin Diversity and the Origin of Our Species«, Nature Communications, Bd. 10, Nr. 3406, 10. September 2019, https://www.nature.com/articles/s41467-019-11213-w

26 Scerri, E. M. L. et al. (2018), »Did Our Species Evolve in Subdivided Populations across Africa, and Why Does It Matter?«, *Trends in* Ecology & Evolution, Bd. 33, Nr. 8, S. 582–594, https://www.cell.com/trends/ecology-evolution/fulltext/S0169-5347(18)30117-4

27 Siehe »Menschen der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024,S. 13

28 Hublin, J. J. et al. (2017), »New Fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the Pan-African Origin of Homo sapiens«, *Nature*, Bd. 546, S. 289–292, https://www.nature.com/articles/nature22336

29 Richter, D. et al. (2017), »The Age of the Hominin Fossils from Jebel Irhoud, Morocco, and the Origins of the Middle Stone Age«, *Nature*, Bd. 546, S. 293–296, https://www.nature.com/articles/nature22335

30 Max-Planck-Gesellschaft: »Langsame und späte Evolution des menschlichen Gehirns«, 24. Januar 2018, https://www.mpg.de/11882963/homo-sapiens-gehirn-evolution

31 Smithsonian National Museum of Natural History, »Ancient DNA and Neanderthals«, https://humanorigins.si.edu/evidence/genetics/ancient-dna-and-neanderthals

32 Max-Planck-Gesellschaft, »Die Neandertaler«, https://www.mpg.de/neandertaler

33 »Menschen der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, S. 72

34 Max-Planck-Gesellschaft, »Die Neandertaler«, https://www.mpg.de/neandertaler

35 https://de.wikipedia.org/wiki/Neandertaler#Schädelknochen

36 Peresani, M. et al. (2011), »Late Neandertals and the Intentional Removal of Feathers as Evidenced from Bird Bone Taphonomy at Fumane Cave 44 ky B. P., Italy«, PNAS, Bd. 108, Nr. 10, S. 3888–3893, https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1016212108

37 Iken, K. (2024), »Dr. med. Sapiens – die Höhlenretter der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/mediziner-der-vorzeit-dr-med-sapiens-a-25e3b80a-d0f6-484e-9a46-d0b97e3e03a8

38 Conde-Valverde, M. et al. (2024), »The Child Who Lived: Down Syn-

drome Among Neanderthals?«, Science Advances, Bd. 10, Nr. 26, 26. Juni 2024, https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adn9310

39 Leder, D. et al. (2021), A 51 000-Year-Old Engraved Bone Reveals Neanderthals' Capacity for Symbolic Behaviour, Nature Ecology & Evolution, Bd. 5, S. 1273–1282, https://www.nature.com/articles/s41559-021-01487-z

40 Gespräch mit Hublin

41 Brown, S., Massilani, D., Kozlikin, M. B. et al. (2022), »The earliest Denisovans and their cultural adaptation«, *Nature*, Bd. 6, S. 28–35 https://www.nature.com/articles/s41559-021-01581-2

42 Eisenstein, M. (2024), »Neanderthal – Human Baby-Making Was Recent and Brief«, *Nature*, 24. Mai 2024, https://www.nature.com/articles/d41586-024-01452-3

43 In Genesis 6,1–2 heißt es: »Als sich die Menschen über die Erde hin zu vermehren begannen und ihnen Töchter geboren wurden, sahen die Gottessöhne, wie schön die Menschentöchter waren, und sie nahmen sich von ihnen Frauen, wie es ihnen gefiel.« Diese Verse klingen sehr merkwürdig in einem religiösen Text, der sich gerade dadurch von anderen Kulten abgrenzt, dass er neben dem einen Gott keine anderen Götter anerkennt. Ist dies ein Überbleibsel alter polytheistischer Gedanken oder eine Verbindung zu griechischen Mythen? Es ist auch denkbar, dass es sich bei den Göttersöhnen um Prinzen von Königsgeschlechtern handelt, die sich zu Göttern erklärt haben, wie bei den Pharaonen. Graeber und Wengrow beschreiben in ihrem Buch Anfänge. Eine neue Geschichte der Menschheit (Stuttgart: Klett-Cotta, 2022) verschiedene neolithische Gesellschaften mit solchen zumindest zeremoniellen Gottkönigen. Vielleicht etwas häretisch frage ich mich aber manchmal, ob dieser Erzählung nicht auch uralte Erinnerungen an Begegnungen mit Neandertalern oder anderen Hominiden und Erectus zugrunde liegen könnten. Homo sapiens empfindet Menschentöchter wahrscheinlich als schöner als Neandertalerinnen, aber Neandertaler waren kräftiger gebaut. Allerdings habe ich keine Ahnung, wie man eine solche These überprüfen und beweisen könnte. Sicher scheint, dass gewaltsamer Geschlechtsverkehr offensichtlich zu den Erfahrungen der Menschen gehört, die diese Geschichte geschrieben haben.

44 Schrenk, F. (2024), »Wann ist ein Mensch ein Mensch?«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 2/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/evolution-wann-ist-ein-mensch-ein-mensch-a-decof77d-cebb-4boe-aeb6-7164a6bf6b1e

45 Mylopotamitaki, D. et al. (2024), »Homo sapiens Reached Northern Europe by 45 000 Years ago«, *Nature*, Bd. 626, S. 341–346, https://www.nature.com/articles/s41586-023-06923-7

46 Z. B. Archäologie in Deutschland, 02/2023, S. 26; Hershkovitz, I. et al. (2018), »The Earliest Modern Humans outside Africa«, *Science*, Bd. 359,

Nr. 6374, S. 456–459, https://www.science.org/doi/10.1126/science.aap8369 López, S., L. van Dorp und G. Hellenthal (2016), »Human Dispersal out of Africa: A Lasting Debate, Evolutionary Bioinformatics«, 21. April 2016, https://journals.sagepub.com/doi/10.4137/EBO.S33489

47 Max-Planck-Gesellschaft (2024), »Der moderne Mensch erreichte das nördliche Europa schon vor 45 000 Jahren«, 31. Januar 2024, https://www.mpg.de/21458955/0126-evan-homo-sapiens-erreichte-das-noerdliche-europa-schon-vor-45-150495-x?c=11968413

48 Cooper, A. et al. (2021), »A Global Environmental Crisis 42 000 Years ago«, *Science*, Bd. 371, Nr. 6531, S. 811–818, https://www.science.org/doi/10.1126/science.abb8677

49 Ebd. Manchmal auch Adams-Ereignis genannt, als Verweis auf Douglas Adams, der in Hitchhiker's Guide to the Galaxy die 42 als Antwort auf die Frage aller Fragen definiert hat.

50 »Geschichte der Menschheit«, Spektrum edition, Bd. 1/2020, S. 42

51 Ebd.

52 Paschek, N. (2018), »Das Gehirn hat immer Hunger«, dasGehirn.info, 1. März 2018, https://www.dasgehirn.info/handeln/ernaehrung/das-gehirn-hat-immer-hunger

53 M. Chazan und K. Luke (2012), »Scientists Find Evidence that Human Ancestors Used Fire One Million Years ago«, EurekAlert!, 2. April 2012, https://www.eurekalert.org/news-releases/725259

54 https://en.wikipedia.org/wiki/Control_of_fire_by_early_humans, Goren-Inbar, N. et al. (2004), »Evidence of Hominin Control of Fire at Gesher Benot Ya'aqov, Israel«, *Science*, Bd. 304, Nr. 5671, S. 725–727, https://www.science.org/doi/10.1126/science.1095443

55 https://theconversation.com/the-worlds-oldest-story-astronomers-say-global-myths-about-seven-sisters-stars-may-reach-back-100-000-years-151568

56 Max-Planck-Gesellschaft (2013), »Konnte der Neandertaler sprechen?«, 10. Juli 2013, https://www.mpg.de/7450884/neandertaler-sprache

57 Conde-Valverde, M. et al. (2021), »Neanderthals and Homo sapiens Had Similar Auditory and Speech Capacities«, Nature Ecology & Evolution, Bd. 5, S. 609–615, https://www.nature.com/articles/s41559-021-01391-6

58 Max-Planck-Gesellschaft, »Die Neandertaler«, https://www.mpg.de/neandertaler

59 Siehe Schrenk, F. (2024), »Wann ist ein Mensch ein Mensch?«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/evolution-wann-ist-ein-mensch-ein-mensch-a-decof77d-cebb-4boe-aeb6-7164a6bf6b1e

60 Hu, W. et al.(2023), »Genomic Inference of a Severe Human Bottle-neck During the Early to Middle Pleistocene Transition«, *Science*, Bd. 381, Nr. 6654, S. 979–984, https://www.science.org/doi/10.1126/science.abq7487

61 Black, B. und A. Schmidt (2021), »When an Ancient Volcanic ›Supereruption‹ Caused Sudden Cooling, Early Humans Got Lucky«, *The Conversation*, 20. Juli 2021, https://theconversation.com/when-an-ancient-volcanic-supereruption-caused-sudden-cooling-early-humans-got-lucky-164199

62 »Menschen der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, S. 43

63 Max-Planck-Gesellschaft (2017), »Neandertaler-DNA beeinflusst, wie leicht wir bräunen«, 5. Oktober 2017, https://www.mpg.de/11532666/neandertaler-dna

64 Bartek, J. (2024), »Mystery Woman's DNA Reveals Close Family Ties between Europe's Earliest People«, *Science*, Bd. 16, Nr. 12, S. 45–67, https://www.science.org/content/article/mystery-woman-s-dna-reveals-close-family-ties-between-europe-s-earliest-people

65 Vernot, B. et al. (2016), »Excavating Neandertal and Denisovan DNA from the Genomes of Melanesian Individuals«, *Science*, Bd. 352, Nr. 6282, S. 235–239, https://www.science.org/doi/10.1126/science. aad9416

66 Hublin, J.-J. (2019), »Denisovaner waren erste Menschenform im Hochland von Tibet«, Max-Planck-Gesellschaft, https://www.mpg.de/14517229/eva_jb_2019

67 Max-Planck-Gesellschaft (2016), »Neanderthals Boosted Our Immune System«, 7. Januar 2016, https://www.mpg.de/9819763/neanderthal-genes-immune-system

68 »Geschichte der Menschheit«, Spektrum edition, Bd. 1/2020, S. 35 ff.

69 Marean, C. W. (2016), »Der Siegeszug des Homo sapiens«, *Spektrum* der Wissenschaft, Bd. 6/2016, S. 48

70 »Geschichte der Menschheit«, Spektrum edition, Bd. 1/2020, S. 39

71 Lörchner, J. (2024), »Am Ende der alten, kalten Welt«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 2/2024, S. 102, https://www.spiegel.de/geschichte/menschheit-in-der-eiszeit-das-ende-der-alten-kalten-welt-a-32a8ec60-d10f-4875-8e88-e6dec4d54e88?context=issue

72 Mafessoni, F. und K. Prüfer (2017), »Better Support for a Small Effective Population Size of Neandertals and a Long Shared History of Neandertals and Denisovans«, PNAS, Bd. 114, Nr. 48, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1716918114

73 Genesis 2,16–17 (Lutherbibel)

74 »Adam und Eva« ist ein Wortspiel und bedeutet sinngemäß Mensch und Menschin, siehe Panzer, L.: Anstöße SWR BW. Morgengedanken SWR4 BW, Kirche im SWR, 26. August 2015, https://www.kirche-im-swr.de/?page=beitraege&id=20404

Hoofdstuk 8: Van jagers tot boeren – van de zondvloed tot beschaving

1 Irving, K. (2024), »Why Did Homo Sapiens Emerge in Africa?«, Live Science, 26. Mai 2024, S. 34–56, https://www.livescience.com/archaeology/

why-did-homo-sapiens-emerge-in-africa Archäologie Online (2019), »Warum der moderne Mensch aus Afrika kommt«, 26. April 2029, https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/warum-der-moderne-mensch-aus-afrika-kommt-4270

2 »Geschichte der Menschheit«, Spektrum edition, Bd. 1/2020, S. 41

3 Clarkson, C. et al. (2017), »Human Occupation of Northern Australia by 65 000 Years ago«, *Nature*, Bd. 547, Nr. 7663, S. 306–310, https://www.nature.com/articles/nature22968

4 Newcomb, T. (2025), »Archaeologists Found 23 000-Year-Old Footprints that Rewrite the Story of Humans in America«, Popular Me-*chanics*, 26. März 2025, https://www.popularmechanics.com/science/archaeology/a64298556/23000-year-old-footprints-new-mexico/

5 »Das große Jagen«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, S. 51

6 »Das Ende der alten, kalten Welt«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 2/2024, S. 100

7 Stewart, M., W. C. Carleton und H. S. Groucutt (2021), »Climate Change, not Human Population Growth, Correlates with Late Quaternary Megafauna Declines in North America«, Nature Communications, Bd. 13, S. 965, https://doi.org/10.1038/s41467-021-21201-8

8 https://de.wikipedia.org/wiki/Lonetal https://de.wikipedia.org/wiki/L%C3%B6wenmensch Hat auch Hublin erwähnt.

9 https://de.wikipedia.org/wiki/Jüngere_Dryaszeit

10 Nunn, P. und M. Cook (2022), »Island Tales: Culturally-Filtered Narratives about Island Creation through Land Submergence Incorporate Millennia-Old Memories of Postglacial Sea-Level Rise«, World Archeology, Bd. 54, Nr. 1, S. 29–51, https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00438243.2022.2077821 Baraniuk, C. (2022), »Memories of the End of the Last Ice Age, from Those Who were There«, Hakai Magazine, 3. Oktober 2022, https://hakaimagazine.com/news/memories-of-the-end-of-the-last-ice-age-from-those-who-were-there/

11 15 Ellen sind knapp sieben Meter.

12 Genesis 6, 17–20 (Lutherbibel)

13 Archäologie in Deutschland, »Mittelsteinzeit«, Bd. 30/2024, S. 11

14 Lundström, V., R. Peters und F. Riede (2020), »Demographic Esti-mates from the Palaeolithic–Mesolithic Boundary in Scandinavia: Comparative Benchmarks and Novel Insights«, Philosophical Trans-actions B, 30. November 2020, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7741095/#s3

15 Archäologie in Deutschland, »Mittelsteinzeit«, Bd. 30/2024, S. 28

16 Ab ca. 5400 v. Chr.; Casanova, E. et al. (2022), »Dating the Emergence of Dairying by the First Farmers of Central Europe Using 14C Analysis of Fatty Acids Preserved in Pottery Vessels«, PNAS, Bd. 118, Nr. 44, 17. Oktober 2022, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2109325118 Archäologie Online (2007), »Als die Bauern noch keine Milch tranken«, 2. März 2007, https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/als-die-bauern-noch-keine-milch-tranken-3

17 https://de.wikipedia.org/wiki/Vere_Gordon_Childe
18 »Menschen der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, S. 119
19 Im weitesten Sinne die Länder an der Ostküste des Mittelmeeres, im engeren Sinne das Gebiet der heutigen Länder Syrien, Libanon, Israel, Jordanien, Teile der Türkei sowie der palästinensischen Autonomiegebiete.
20 Renfrew, C. und P. Bahn (2009), Basiswissen Archäologie, Mainz: Philipp von Zabern, 2009, S. 254, https://de.wikipedia.org/wiki/Natufien
21 »Menschen der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Nr. 2/2024, S. 119
22 Archäologie in Deutschland, »Frühe Bauern«, Bd. 5/2023, S. 21
23 Z. B. https://de.wikipedia.org/wiki/Ohalo_II
24 *Spektrum* (2007), »Lebte Homo erectus in Siedlungen?«, 26. Juni 2007, https://www.spektrum.de/news/lebte-homo-erectus-in-siedlungen/892349
25 Archäologie in Deutschland, »Frühe Bauern«, Bd. 5/2023, S. 22
26 *scinexx* (2018), »Archäologe als Fälscher entlarvt«, 14. März 2018, https://www.scinexx.de/news/geowissen/archaeologe-als-faelscher-entlarvt/, https://de.wikipedia.org/wiki/Dorak-Aff%C3%A4re
27 Graeber, D. und D. Wengrow D. (2022), Anfänge. Eine neue Ge-*schichte der Menschheit*, Stuttgart: Klett-Cotta, S. 237
28 Ledger, M. L. et al. (2019), »Parasite Infection at the Early Farming Community of Çatalhöyük«, Antiquity, Bd. 93, Ausgabe 369, S. 573–587, https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/abs/parasite-infection-at-the-early-farming-community-of-catalhoyuk/71D77AF9D6895DE334D76721AFED65BF
29 News Staff (2019), »Neolithic Çatalhöyük Experienced Modern Urban Problems«, Sci-News, 18. Juni 2019, https://www.sci.news/archaeology/catalhoyuk-urban-problems-07300.html Allerdings gab es Karies und sogar Zahnbehandlungen schon vorher: Oxilia, G. et al. (2015), »Earliest Evidence of Dental Caries Manipulation in the Late Upper Palaeolithic«, Scientific Reports, Bd. 5, Nr. 12150, 16. Juli 2015, https://www.nature.com/articles/srep12150
30 Genesis 3, 17b (Lutherbibel).
31 Marean, C. W. (2016), »Der Siegeszug des Homo sapiens«, *Spektrum* der Wissenschaft, Ausgabe 6/2016, S. 48
32 »Menschen der Steinzeit«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 2/2024, S. 119 Redaktion Archäologie Online (2020), »Klima war der Schlüssel-faktor bei der Ausbreitung der ersten Bauern in Europa«, Archäologie Online, 20. Juli 2020, https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/klima-war-der-schluesselfaktor-bei-der-ausbreitung-der-ersten-bauern-in-europa-4708/
33 Renfrew, C. und P. Bahn (2009), Basiswissen Archäologie, Mainz: Philipp von Zabern, S. 255
34 Krichmayr, K. (2023), »DNA-Forscher Willerslev: ›Unsere Gene sind ein Resultat von Migration‹«, *Der Standard*, 23. Dezember 2023, https://

www.derstandard.de/story/3000000199647/dna-forscher-willerslev-unsere-gene-sind-ein-resultat-von-migration

35 Kjær, K. H. et al. (2022), »A 2-Million-Year-Old Ecosystem in Greenland Uncovered by Environmental DNA«, *Nature*, Bd. 612, S. 283–291, https://www.nature.com/articles/s41586-022-05453-y

36 Max-Planck-Gesellschaft (2023), »Ötzi: Dunkle Haut, Glatze, anatolische Vorfahren«, 16. August 2023, https://www.mpg.de/20713049/0804-evan-dunkle-haut-glatze-anatolische-vorfahren-150495-x Kleinhubbert, G. (2023), »Hautsache dunkel: Ötzi kam aus Anatolien«, Menschen der Steinzeit, *Spiegel Geschichte*, Nr. 2/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/hautsache-dunkel-oetzi-kam-aus-anatolien-a-f145baf7-daec-4b74-811c-c93de66be7c9

37 Archäologie in Deutschland, »Frühe Bauern«, Bd. 5/2023, S. 26

38 Ebd., S. 21

39 »Menschen der Steinzeit«, Spiegel Geschichte, Bd. 2/2024, S. 119

40 https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Keramik

41 https://de.wikipedia.org/wiki/Linearbandkeramische_Kultur

42 Archäologie in Deutschland, »Frühe Bauern«, Bd. 5/2023, S. 22

43 Ebd., S. 38

44 »In der Evolution ist alles ein Spiel von Anpassung und Zufall«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 2/2024, S. 25

45 Archäologie in Deutschland, »Frühe Bauern«, Bd. 5/2023, S. 27

46 Graeber, D. und D. Wengrow (2022), Anfänge. *Eine neue Geschichte der Menschheit*, Stuttgart: Klett-Cotta, S. 287; https://de.wikipedia.org/wiki/Grabenanlage_von_Herxheim

47 Allentoft, E. et al. (2024), »100 Ancient Genomes Show Repeated Population Turnovers in Neolithic Denmark«, *Nature*, Bd. 625, S. 329–337, https://www.nature.com/articles/s41586-023-06862-3

48 Allentoft, M. E. et al. (2024), »100 Ancient Genomes Show Repeated Population Turnovers in Neolithic Denmark«, *Nature*, Bd. 625, S. 329–337, https://doi.org/10.1038/s41586-023-06862-3 https://www.sciencedaily.com/releases/2024/02/240208121958.htm

49 Genesis 4,8–12 (Lutherbibel)

50 Curry, A. (2021), »Milk Fueled Bronze Age Expansion by Eastern Cowboys into Europe«, *Science*, 15. September 2021, https://www.science.org/content/article/milk-fueled-bronze-age-expansion-eastern-cowboys-europe

51 Ewe, T. (2015), »Die geheimnisvollen Dritten«, Bild der Wissenschaft, 18. August 2015, https://www.wissenschaft.de/geschichte-archaeologie/die-geheimnisvollen-dritten/ Lazaridis, I. et al. (2025), »The Genetic Origin of the Indo-Europeans«, *Nature*, Bd. 639, S. 132–142, https://www.nature.com/articles/s41586-024-08531-5 Nikitin, A. G. et al. (2025), »A Genomic History of the North Pontic Region from the Neolithic to the Bronze Age«, *Nature*, Bd. 639, S. 124–131, https://www.nature.com/articles/s41586-024-08372-2

52 Lazaridis, I. et al. (2014), »Ancient human genomes suggest three ancestral populations for present-day Europeans«, *Nature*, Bd. 513, S. 409–413, https://www.nature.com/articles/nature13673

53 Barrie, W. et al. (2024), »Elevated Genetic Risk for Multiple Scle-rosis Emerged in Steppe Pastoralist Populations«, *Nature*, Bd. 625, S. 321–328, https://www.nature.com/articles/s41586-023-06618-z Garget, J. (2024), »Ancient DNA Reveals Reason for High MS and Alzheimer's Rates in Europe«, University of Cambridge, 10. Januar 2024, https://www.cam.ac.uk/stories/disease-spread-mapped-using-ancient-DNA Curry, A. (2021), »Milk Fueled Bronze Age Expansion by Eastern Cowboys into Europe«, *Science*, 15. September 2021, https://www.science.org/content/article/milk-fueled-bronze-age-expansion-eastern-cowboys-europe

54 Curry, A. (2020), »Warrior Skeletons Reveal Bronze Age Europeans Couldn't Drink Milk«, *Science*, 3. September 2020, https://www.science.org/content/article/warrior-skeletons-reveal-bronze-age-europeans-couldn-t-drink-milk

55 https://de.wikipedia.org/wiki/Abri_Blanchard

56 Darvill, T. (2022), »Keeping Time at Stonehenge«, Antiquity, Bd. 96, Nr. 386, S. 319–335, https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/keeping-time-at-stonehenge/792A5E8E091C8B7CB9C26B4A35A6B399

57 Gaffney, V. et al., »Time and a Place: A Luni-Solar ›Time-Reckoner‹ from 8th Millennium BC Scotland«, Internet Archaeology, https://intarch.ac.uk/journal/issue34/gaffney_toc.html

58 Genesis 1, 14–16 (Lutherbibel)

59 Dazu gehören die germanischen, romanischen, slawischen, baltischen und keltischen Sprachen, aber auch Griechisch, Albanisch, Armenisch, Persisch, Paschtu oder auch Hindi und Urdu.

60 Mit Dank an Prof. Dr. Martin Joachim Kümmel: In einem vergleichenden Wörterbuch wird bei beiden Bedeutungen jeweils festgestellt, dass das älteste indoeuropäische Wort für »Mond, Monat« oft in der ersten Bedeutung ersetzt wird (also der Himmelskörper), aber in der zweiten (also der Zeitangabe) praktisch immer erhalten bleibt: Buck, C. D. (1949), A Dictionary of Selected Synonyms in the Principal Indo-European Languages. A Contribution to the History of Ideas, Chicago: University of Chicago Press, S. 54 f. zu »moon«, S. 1010 f. zu »month«, speziell S. 55 bzw. S. 1010 über den Ersatz des alten Wortes durch ein neues in der Bedeutung »Mond«. Im Hebräischen sind die Wörter für »Monat«, »Neumond« und »neu« mehr oder weniger dieselben. Der Mond selber heißt aber anders.

61 https://de.wikipedia.org/wiki/Helium

62 https://de.wikipedia.org/wiki/Berliner_Goldhut

63 Menghin, W. (2008), »Zahlensymbolik und digitales Rechnersystem in

der Ornamentik des Berliner Goldhutes«, Acta Praehistorica et Archaeologica, Bd. 40.

64 Universität Heidelberg (2017), »Die Entstehung der Metallurgie hat vermutlich nicht nur einen ›Geburtsort‹«, 1. September 2017, https://www.uni-heidelberg.de/presse/news2017/pm20170901_die-entstehung-der-metallurgie-hat-vermutlich-nicht-nur-einen-geburtsort.html

65 https://de.wikipedia.org/wiki/Kupfersteinzeit

66 https://en.wikipedia.org/wiki/Pločnik_(archaeological_site) Deutsches Bergbau-Museum Bochum, »The Rise of Metallurgy in Eurasia: Evolution, Organisation and Consumption of Early Metal in the Balkans«, https://www.bergbaumuseum.de/forschung/forschungsprojekte/the-rise-of-metallurgy-in-eurasia

67 Südtiroler Archäologiemuseum, »Ötzis Ausrüstung«, https://www.iceman.it/de/oetzi/ausruestung

68 Artioli, G. (2017), »Long-Distance Connections in the Copper Age: New Evidence from the Alpine Iceman's Copper Axe«, PLOS ONE, Bd. 12, Nr. 12, 7. Dezember 2017, https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0179263

69 Rössener-Kultur: https://de.wikipedia.org/wiki/Rössener_Kultur

70 Südtiroler Archäologiemuseum, »Ötzis Ausrüstung«, https://www.iceman.it/de/oetzi/ausruestung Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 110

71 https://archaeology.org/news/2024/08/28/evidence-of-copper-pollution-found-in-ancient-egyptian-harbor/

72 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 120 https://utppublishing.com/doi/10.3138/9781442603851.003

73 https://de.wikipedia.org/wiki/Chim%C3%BA-Kultur

74 Simmons, S. E. und A. N. Shugar, (2013), »Maya Metallurgical Technology in Late Postclassic–Spanish Colonial Times: The View from Lamanai, Belize«, ArchéoSciences, Bd. 37, S. 105–125, https://journals.openedition.org/archeosciences/4071

75 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 121

76 »Die Archäologie Chinas«, Antike Welt, Bd. 18/23, S. 69

77 Ebd., S. 45 f., https://de.wikipedia.org/wiki/Sanxingdui

78 Onder, T. G., L. Özen und T. Zimmermann (2011), »Ein neues Schwert vom Typus ›Arslantepe‹ – frühmetallzeitliche Waffen-technologie zwischen Repräsentation und Ritual«, Praehistorische Zeitschrift, Bd. 86, Https://www.academia.edu/6916082/Ein_neues_Schwert_vom_Typus_Arslantepe_fr%C3%BChmetallzeitliche_Waffentechnologie_zwischen_Repr%C3%A4sentation_und_Ritual

79 Miera, J. (2020), »Die Bronzezeit, Verarbeitung von Bronze«, Praehistorische Archäologie, 20. September 2020, https://www.praehistorische-archaeologie.de/wissen/die-bronzezeit/

80 »Werkzeugherstellung in der Steinzeit: Streitaxt«, Internet-Portal »Westfälische Geschichte«, https://www.lwl.org/westfaelische-geschichte/portal/Internet/finde/langDatensatz.php?urlID=294&url_tabelle=tab_medien

81 Der Spiegel (2019), »Besitz und Status wurden schon zur Bronzezeit vererbt«, 12. Oktober 2019, https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/bronzezeit-besitz-und-status-wurden-damals-schon-vererbt-a-1291267.html

82 https://de.wikipedia.org/wiki/F%C3%BCrstengrab_von_Leubingen, https://www.youtube.com/watch?v=2HVWyUq6UuY&t=374s 12:25 »Die Bronzezeit«, Geo Epoche (2023), Bd. 123, S. 54 ff.

83 »Die Bronzezeit«, Geo Epoche (2023), Bd. 123, S. 59

84 https://de.wikipedia.org/wiki/Gold Aber das Rätsel des kosmischen Ursprungs von Gold ist noch nicht vollständig geklärt. Siegel, E. (2024), »Our Best Idea for the Origin of Gold Doesn't Add Up«, Big Think, 8. Mai 2024, https://bigthink.com/starts-with-a-bang/origin-gold/

85 Hoofdstuk 4

86 Werner, M. (2018), »Gold-Steckbrief«, Planet Wissen, 5. November 2018, https://www.planet-wissen.de/gesellschaft/wirtschaft/gold/pwiegoldeigenschaften100.html

87 https://de.wikipedia.org/wiki/Ophir

88 https://de.wikipedia.org/wiki/Schlachtfeld_im_Tollensetal#Knochen_und_Waffen

89 Archäologie Online (2019), »Das Rätsel des bronzezeitlichen Zinns«, 18. September 2019, https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/das-raetsel-des-bronzezeitlichen-zinns-4427/

90 »Die Bronzezeit«, Geo Epoche (2023), Bd. 123, S. 57

91 Nørgaard, H. W., E. Pernicka und H. Vandkilde, H. (2019), »On the Trail of Scandinavia's Early Metallurgy: Provenance, Transfer and Mixing«, PLOS ONE, Bd. 14, Nr. 12, 30. Dezember 2019, https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0219574

92 Knipper, C. et al. (2017), »Female Exogamy and Gene Pool Diversification at the Transition from the Final Neolithic to the Early Bronze Age in Central Europe«, PNAS, Bd. 114, Nr. 38, S. 10083–10088, https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1706355114

93 Patalong, F. (2021), »Die Mischung zur Macht. Warum die Bronzezeit die Welt veränderte«, *Spiegel Geschichte*, Bd. 6/2021, https://www.spiegel.de/geschichte/bronzezeit-die-neue-metalllegierung-veraenderte-die-welt-und-loeste-europas-erste-globalisierung-aus-a-a8c-71de8-0002-0001-0000-000180025317

94 Dieck, S. et al. (2024), »Archaeometallurgical Investigation oft the Nebra Sky Disc«, Scientific Reports, 21. November 2024, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11582812/ (Datierung nur über Beifunde)

95 https://de.wikipedia.org/wiki/Plejaden

96 Archäologie in Deutschland, »Megabauten der Steinzeit«, Bd. 5/2021, S. 44 f.
97 Ebd.
98 https://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements#Earth
99 https://de.wikipedia.org/wiki/Eisen#Biologische_Bedeutung
100 Miera, J. (2021), »Ein neuer Werkstoff verändert Europa«, Praehistorische Archäologie, 16. Februar 2021, https://www.praehistorische-archaeologie.de/wissen/die-eisenzeit/
101 Ebd.
102 Miera, J. (2020), »Die Verhüttung von Eisen«, Praehistorische Archäologie, 20. September 2020, https://www.praehistorische-archaeologie.de/wissen/die-eisenzeit/eisenverhuettung/
103 https://de.wikipedia.org/wiki/Rennofen
104 https://de.wikipedia.org/wiki/Zusammenbruch_der_Bronzezeit
105 Maran, J. (o. J.), »Licht auf ein dunkles Jahrhundert«, Universität Heidelberg, https://www.uni-heidelberg.de/presse/ruca/ruca2_2002/maran.html
106 https://de.wikipedia.org/wiki/Dunkle_Jahrhunderte_
107 https://en.wikipedia.org/wiki/Hekla_3_eruption
108 *Spektrum* (2009), »›Dunkle Jahrhunderte‹ doch nicht so dunkel«, 17. April 2009, https://www.spektrum.de/news/archaeologie-dunkle-jahrhunderte-doch-nicht-so-dunkel/991921

Hoofdstuk 9: Van steden tot imperiums

1 Persönlicher Besuch Jörg Römer in Knossos 2021
2 https://de.wikipedia.org/wiki/Labyrinth
3 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 140 https://de.wikipedia.org/wiki/Knossos
4 https://de.wikipedia.org/wiki/Labrys
5 https://de.wikipedia.org/wiki/Minoische_Religion
6 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 122
7 Podbregar, N. (2015), »Die älteste Stadt der Welt«, *scinexx*, 3. Juli 2015, https://www.scinexx.de/dossier/die-aelteste-stadt-der-welt/
8 Grolle, J. (2024), »Die erste Stadt der Weltgeschichte«, Der Spiegel, Ausgabe 13/2024, https://www.spiegel.de/wissenschaft/uruk-im-zweistromland-die-erste-stadt-der-weltgeschichte-a-25d6da40-072c-48be-9582-9f55b7d33f7b
9 Rautenberg, M. (2022), »Urbanes Uruk: Die erste Großstadt der Menschheit«, National Geographic, 13. Dezember 2022, https://www.nationalgeographic.de/geschichte-und-kultur/2022/12/urbanes-uruk-die-erste-grossstadt-der-menschheit

10 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 125
11 Staatliche Museen zu Berlin, Virtueller Rundgang: Uruk 5000, https://storage.smb.museum/Virtueller_Rundgang/Uruk_5000/
12 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 134
13 Vortrag von van Ess im Deutschen Archäologischen Institut, Berlin, 11. April 2022
14 Clarke, J. et al. (2016), »Climatic Changes and Social Transformations in the Near East and North Africa during the ›Long‹ 4th Millennium BC: A Comparative Study of Environmental and Archaeological Evidence«, Quaternary Science Reviews, Bd. 136, S. 96–121, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027737911530127X
15 Staatliche Museen zu Berlin, Virtueller Rundgang: Uruk 5000, https://storage.smb.museum/Virtueller_Rundgang/Uruk_5000/
16 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 122
17 https://de.wikipedia.org/wiki/Indogermanische_Sprachen
18 Max-Planck-Gesellschaft (2012), »Indogermanische Sprachen entstanden in Anatolien«, 23. August 2012, https://www.mpg.de/6330170/indogermanische-sprachen
19 Max-Planck-Gesellschaft (2023), »Neue Theorie zum Ursprung der indogermanischen Sprachen«, 27. Juli 2023, https://www.mpg.de/20664457/0725-evan-ursprung-der-indogermanischen-sprachen-150495-x
20 https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_historischer_Stadtgr%C3%BCndungen
21 https://de.wikipedia.org/wiki/Caral, https://www.science.org/doi/10.1126/science.1059519
22 Miss Jones (2020), »Caral-Supe verdammt clever in Südamerika«, 20. Dezember 2020, https://www.miss-jones.de/2020/12/20/adventskalender-tuer-20-caral-supe-verdammt-clever-in-suedamerika/
23 Rostain, S. et al. (2024), »Two Thousand Years of Garden Urbanism in the Upper Amazon«, *Science*, Bd. 383, Nr. 6679, S. 183–189, https://www.science.org/doi/10.1126/science.adi6317
24 Schnurr, E.-M. und F. Thadeusz (2024), »Warum soziale Unterschiede in Städten entstanden«, Spiegel Geschichte, Nr. 3/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/staedte-warum-der-mensch-fu-r-das-urbane-leben-nur-bedingt-gemacht-ist-a-964ff272-a847-48b1-876f-d933877d4c49
25 Ebd.
26 »Vom armen B. B.«, in: Die Gedichte von Bertolt Brecht in einem Band, Frankfurt a. M.: Suhrkamp 1981, S. 261–263, Zitat S. 262.
27 Schnurr, E.-M. und F. Thadeusz (2024), »Warum soziale Unterschiede in Städten entstanden«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 3/2024, https://www.spie-

gel.de/geschichte/staedte-warum-der-mensch-fu-r-das-urbane-leben-nur-bedingt-gemacht-ist-a-964ff272-a847-48b1-876f-d933877d4c49

28 https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Epidemien_und_Pandemien

29 https://de.wikipedia.org/wiki/Attische_Seuche

30 Schnurr, E.-M. und F. Thadeusz (2024), »Warum soziale Unterschiede in Städten entstanden«, *Spiegel Geschichte*, Ausgabe 3/2024, https://www.spiegel.de/geschichte/staedte-warum-der-mensch-fu-r-das-urbane-leben-nur-bedingt-gemacht-ist-a-964ff272-a847-48b1-876f-d933877d4c49

31 Ganslmeier, M. (2024), »New York entdeckt die Mülltonne«, Tagesschau, 18. Juli 2024, https://www.tagesschau.de/ausland/amerika/newyork-muelltonne-abfall-100.html

32 https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestattung&oldformat=true#Geschichte

33 https://de.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6bekli_Tepe

34 https://de.wikipedia.org/wiki/Kreisgrabenanlage_von_Pömmelte#Schachtgruben Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, »Forschungsgeschichte: Fundort Pömmelte«, eMuseum Himmels-wege, https://www.emuseum-himmelswege.de/dig-deeper/fundort-poemmelte/forschungsgeschichte

35 Darvill, T. (2022), »Keeping Time at Stonehenge«, Antiquity, Bd. 96, Nr. 386, S. 319–335, https://www.cambridge.org/core/journals/antiquity/article/keeping-time-at-stonehenge/792A5E8E091C8B7CB 9C26B4A35A6B399

36 https://de.wikipedia.org/wiki/Sumerische_Religion#Sumerische_Mythen_und_die_Bibel

37 https://de.wikipedia.org/wiki/Eanna

38 https://de.wikipedia.org/wiki/Uruk

39 https://de.wikipedia.org/wiki/Zikkurat

40 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 126

41 »Götter machen Städte – Urbanität und Religion«, Antike Welt, Bd. 3/2023, S. 8

42 Ebd, S. 11, Pergamonaltar

43 https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1808103115

44 Volk, K. et al. (o. J.), »Spätbabylonische Mathematische Astronomie«, Universität Tübingen, https://fit.uni-tuebingen.de/Project/Details?id=2020

45 https://de.wikipedia.org/wiki/Venus-Tafeln_des_Ammi-saduqa

46 Franz, A. (2016), »Babylonier rechneten mit Trapezformel«, Der Spiegel, 29. Januar 2016, https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/babylonier-berechneten-jupiter-bahn-mit-geometrie-a-1074529.html

47 https://de.wikipedia.org/wiki/Astrologie#Geschichte_der_westlichen_Astrologie

48 Boockmann, F. et al. (2008), »›Nicht das Kindt mit dem Badt außschütten‹: Zur Rolle einer Pseudowissenschaft im Zeitalter der wissenschaftlichen Revolution: Die Strologie bei Johannes Kepler, Heinrich Rantzau und Galileo Galilei«, Akademi Aktuell, Ausgabe 4/2008, S. 51–60, https://badw.de/fileadmin/pub/akademieAktuell/2008/27/19_DiLicia.pdf

49 https://de.wikipedia.org/wiki/Babylonische_Mathematik

50 https://de.wikipedia.org/wiki/Babylonischer_Kalender

51 Droschmann, M. (2020), »Eine kurze Geschichte über das alte Ägypten«, ZDF-Dokumentation, 12. April 2020, https://www.zdf.de/dokumentation/terra-x/eine-kurze-geschichte-ueber-das-alte-aegypten-mit-mirko-drotschmann-100.html

52 »Das alte Ägypten«, Geo Epoche, Bd. 32, 2008

53 Nil und Nil-Delta aus dem Orbit fotografiert, https://de.wikipedia.org/wiki/Nildelta#/media/Datei:Nile_River_and_delta_from_orbit.jpg

54 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, 1990, S. 128

55 https://de.wikipedia.org/wiki/Horus#:~:text=Horus%20

56 https://de.wikipedia.org/wiki/Alt%C3%A4gyptische_Beamten-_und_Funktionstitel

57 Clausen, S. und M. Hucko (2023), »Wundermittel gegen den Tod – wie Milliardäre in das ewige Leben investieren«, *Manager Magazin*, 3. März 2023, https://www.manager-magazin.de/unternehmen/longevity-wundermittel-gegen-den-tod-wie-milliardaere-in-ihr-ewiges-leben-investieren-a-f1120dd7-ccaa-4fa6-9034-b4573011f7b4

58 https://de.wikipedia.org/wiki/Pyramiden_von_China

59 Besuch von Jörg Römer im Great Egyptian Museum in Kairo und in dessen Werkstätten

60 https://de.wikipedia.org/wiki/Alt%C3%A4gyptische_Religion#G%C3%B6tterkulte; Graur, O. (2025), »The Ancient Egyptian Cosmological Vignette: First Visual Evidence of The Milky Way and Trends in Coffin De-pictions of The Sky Goddess Nut«, Journal of Astronomical History and Heritage, Bd. 1, S. 97–124, https://doi.org/10.3724/SP.J.140-2807.2025.01.06

61 https://de.wikipedia.org/wiki/Horus#:~:text=Horus%20

62 Das ist die Erzählung von der Entstehung des Kosmos und der Welt in sieben Tagen, direkt gefolgt von der Geschichte der Menschwerdung von Adam und Eva.

63 Nickels, L. (o. J.), »Nil: Schöpfungsmythos«, Planet Wissen, https://www.planet-wissen.de/natur/fluesse_und_seen/der_nil/pwieschoepfungsmythosnil100.html

64 Antike Welt und Archäologie in Deutschland (2021), »Klimalektionen aus dem alten Ägypten«, 6. August 2021, https://www.herder.de/wbg-magazine/aktuelles/2020-2022/klimalektionen-aus-dem-alten-aegypten/

65 https://de.wikipedia.org/wiki/4,2-Kilojahr-Ereignis
66 Marshall, M. (2023), »Klimageschichte: Die Megadürre, die vielleicht keine war«, *Spektrum*, 6. Dezember 2023, https://www.spektrum.de/news/klimageschichte-die-megaduerre-die-vielleicht-keine-war/1981456
67 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 138; https://de.wikipedia.org/wiki/Deir_el-Medina
68 https://de.wikipedia.org/wiki/Alexander_der_Gro%C3%9Fe
69 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, Südwest Verlag, München, S. 144
70 https://de.wikipedia.org/wiki/Linearschrift_B
71 Sperlich, W. (2015), »Auf den Spuren Homers«, *Spektrum*, 19. Mai 2015, https://www.spektrum.de/magazin/auf-den-spuren-homers/1343329
72 Der Spiegel (2024), »Christopher Nolan verfilmt Homers ›Odyssee‹«, 24. Dezember 2024, https://www.spiegel.de/kultur/christopher-nolan-verfilmt-homers-odyssee-a-ae4116ef-c14f-4347-bf22-6555a2bbc60c
73 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, 1990, S. 144
74 Ebd., S. 162
75 https://de.wikipedia.org/wiki/Agora
76 Sächsische Landeszentrale für politische Bildung, »Eine kurze Geschichte der Demokratie«, https://www.slpb.de/themen/staat-und-recht/politische-theorie/eine-kurze-geschichte-der-demokratie
77 Ebd.
78 Deutsches Archäologisches Institut, »Ostraka mit den Namen Aristeides, Themistokles, Kimon und Perikles«, https://arachne.dainst. org/entity/3991258
79 https://de.wikipedia.org/wiki/Attische_Demokratie#Demokratische_Wende
80 Großbritannien wird oft als »Mutter der Demokratie« beschrieben, das gilt aber nur für die »moderne« Demokratie.
81 Ebd.
82 Siehe Weltkarte von Hekataios: https://de.wikipedia.org/wiki/Hekataios_von_Milet
83 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 164 https://de.wikipedia.org/wiki/Ai_Khanoum
84 https://de.wikipedia.org/wiki/Bibliothek_von_Alexandria
85 https://de.wikipedia.org/wiki/Pythagoras
86 https://de.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes
87 Boschung, D. (o. J.), »Das Weltbild in der Antike und seine Darstellung«, https://perspectivia.net/servlets/MCRFileNodeServlet/ploneimport4_derivate_00011985/boschung_weltbild.doc.pdf
88 https://de.wikipedia.org/wiki/Geozentrisches_Weltbild
89 https://de.wikipedia.org/wiki/Hekataios_von_Milet

90 https://de.wikipedia.org/wiki/Paulus_von_Tarsus
91 »Römer, Mythen, Vorurteile: Das alte Rom und die Macht«, Antike Welt, Sonderheft 2022, S. 15
92 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 170
93 Statista (1979), »Historische Ausbreitung des (West-)Römischen Reiches in den Jahren 500 v. Chr. bis 476 n. Chr.«, https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1097941/umfrage/historische-ausbreitung-des-roemischen-reiches/
94 »Römer, Mythen, Vorurteile: Das alte Rom und die Macht«, Antike Welt, Sonderheft 2022, S. 57
95 https://de.wikipedia.org/wiki/Römische_Republik
96 https://de.wikipedia.org/wiki/Zivilisation#:~:text=Etymologisch%20
97 Lamm, L. (2023), »Jahrtausendealter Superbeton: Warum die Gebäude der Römer bis heute stehen«, National Geographic, Januar 2023, https://www.nationalgeographic.de/geschichte-und-kultur/2023/01/jahrtausendealter-superbeton-warum-die-gebaeude-der-roemer-bis-heute-stehen-altes-rom-beton
98 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 179 Der Spiegel (2024), »Wegen Hitze – Athen reaktiviert römisches Aquädukt«, 26. Dezember 2024, https://www.spiegel.de/ausland/athen-reaktiviert-roemisches-aquaedukt-um-mehr-wasser-zu-gewinnen-a-74222993-ceae-45ce-960a-285b5c7fc614
99 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Süd-west Verlag, S. 179; https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/rekorde/von-newcomen-bis-watt-wie-die-dampfmaschine-die-welt-veraenderte/
100 https://de.wikipedia.org/wiki/Mittelgriechische_Sprache
101 https://de.wikipedia.org/wiki/Julianischer_Kalender
102 Katholisch.de (2024), »Papst Franziskus will einheitliches Osterdatum«, 19. September 2024, https://www.katholisch.de/artikel/56142-papst-franziskus-will-einheitliches-osterdatum
103 Jesus Christus ist wahrscheinlich einige Jahre vor Christi Geburt geboren. Auch da war er also seiner Zeit voraus.
104 »Die Vielfalt des antiken Christentums«, Antike Welt, Ausgabe 6/2021, S. 8
105 Matthäus 22,21 (Lutherbibel)
106 »Die Vielfalt des antiken Christentums«, Antike Welt, Ausgabe 6/2021, S. 12
107 Allerdings wird im biblischen Text nur von den Weisen aus dem Morgenland beziehungsweise den μάγοι (»magoi«, wörtlich »Magier«) erzählt. Von Königen oder der Anzahl drei ist dort nicht die Rede.
108 Kennedy, J. (2024), »The Birth of Jesus Would Probably Have Been Forgotten – if It Wasn't for a Plague«, The Guardian, 25. Dezember 2024,

https://www.theguardian.com/commentisfree/2024/dec/25/birth-jesus-plague-roman-empire-christianity

109 https://en.m.wikipedia.org/wiki/Biblical_manuscript

110 »Die Vielfalt des antiken Christentums«, Antike Welt, Ausgabe 6/2021, S. 24

111 https://de.wikipedia.org/wiki/Reichskrise_des_3._Jahrhunderts

112 https://de.wikipedia.org/wiki/Untergang_des_Römischen_Reiches

113 Kulke, U. (2015), »Erderwärmung bescherte Römischem Reich fette Jahre«, Die Welt, 9. Dezember 2015, https://www.welt.de/geschichte/article149773123/Erderwaermung-bescherte-Roemischem-Reich-fette-Jahre.html

114 Berndt, C. (2020), »Der Untergang einer Supermacht«, Dlf Kultur, 8. Juli 2020, https://www.deutschlandfunkkultur.de/rom-in-der-spaetantike-der-untergang-einer-supermacht-100.html

115 Universität Greifswald (2022), »Greifswald im Mondschein: Lassen sich die Gemälde von Caspar David Friedrich für die Klimaforschung nutzen?«, 18. November 2022, https://www.uni-greifswald.de/universitaet/information/aktuelles/detail/n/greifswald-im-mondschein-lassen-sich-die-gemaelde-von-caspar-david-friedrich-fuer-die-klimaforschung-nutzen/

116 Archäologie Online (2020), »Ursache des Klimaschocks im alten Rom geklärt«, 26. Juni 2020, https://www.archaeologie-online.de/nachrichten/ursache-des-klimaschocks-im-alten-rom-geklaert-4681/ McConnell, J. R. et al. (2020), »Extreme Climate after Massive Eruption of Alaska's Okmok Volcano in 43 BCE and Effects on the Late Roman Republic and Ptolemaic Kingdom«, PNAS, Bd. 117, Nr. 27, S. 15443–15449, https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2002722117

117 »Klimawandel. Dürre, Hitze, Flut und Eis«, Archäologie in Deutschland, Bd. 3/2022, S. 28

118 https://de.wikipedia.org/wiki/Justinianische_Pest

119 »Klimawandel. Dürre, Hitze, Flut und Eis«, Archäologie in Deutschland, Bd. 3/2022, S. 34 f., https://de.wikipedia.org/wiki/Kleine_Eiszeit

120 https://de.wikipedia.org/wiki/Hungerbrot

121 https://de.wikipedia.org/wiki/Gro%C3%9Fe_Hungersnot_in_Irland

122 https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_gr%C3%B6%C3%9Ften_Imperien_und_Reiche

123 »Die Archäologie Chinas«, Antike Welt, Bd. 18/23, Sonderheft, S. 10

124 Scarre, C. (1990), Times Atlas der Archäologie, München: Südwest Verlag, S. 146

125 https://de.wikipedia.org/wiki/Chinesische_Mauer

126 Harvard Visual China, »Haihunhou: The Tomb of the Emperor Who Reigned Only 27 Days, A Symposium«, 3. April 2017, https://www.harvardvisualchina.com/haihunhou »Die Archäologie Chinas«, Antike Welt, Bd. 18/23, Sonderheft, S. 15

127 https://de.wikipedia.org/wiki/Aksumitisches_Reich#R%C3%B6misch-indischer_Handel,_Christianisierung_ (Mitte_4._Jahrhundert)
128 https://de.m.wikipedia.org/wiki/Mittelalterliche_Klimaanomalie
129 https://de.m.wikipedia.org/wiki/Kleine_Eiszeit
130 Um die Geschichte des Teleskops rankte sich ein langer Experten-streit. Die Erfindung durch einen »frommen Brillenmacher aus Middelburg« und seine Vorführung im September 1608 vor dem niederländischen Oberbefehlshaber Prins Maurits (Moritz), seinem späteren Nachfolger Prins Hendrik sowie dem spanischen General Spinola und wahrscheinlich weiteren Diplomaten ist historisch belegt und die Geschichte ist sogar ausgesprochen amüsant zu lesen (https://brunelleschi.imss.fi.it/telescopiogalileo/index.html). In Middelburg kann man heute das Hans Lipperhey Museum besichtigen und sich mitten in der Middelburger Abtei neben seine Statue setzen, die ich am 29. 6. 2021 dort enthüllen durfte. Seitdem bin ich natürlich Lipperhey-Fan.

Hoofdstuk 10: Apocalyps en hoop

1 Alexander Kenneth Nagel, Religionssoziologe, Universität Göttingen, »Die Geschichte der Apokalypse – immer wieder ist Weltuntergang«, Podcast »Der Rest ist Geschichte« Biesler, J. (2023), »Die Geschichte der Apokalypse. Immer wieder Weltuntergang«, Deutschlandfunk, 6. April 2023, https://www.deutschlandfunk.de/immer-wieder-weltuntergang-die-geschichte-apokalyptischen-denkens-dlf-foe98253-100.html
2 MDR AKTUELL (2024), »Jugend in Deutschland ist pessimistischer geworden – Generation Zukunftsangst?«, MDR, 23. April 2024, https://www.mdr.de/nachrichten/deutschland/gesellschaft/jugend-sorgen-deutschland-generation-z-100.html
3 Zitiert aus Herrnhuter Brüdergemeine (2025), »Die Losungen für junge Leute 2025«, Evangelische Brüder-Unität im Friedrich Rein-hardt Verlag, Lörrach/Basel, siehe auch: Zapruder, A., »Holocaust-Tagebücher von Anne Frank und anderen jungen Menschen«, anne frank house, https://www.annefrank.org/de/anne-frank/vertiefung/holocaust-tagebucher-von-anne-frank-und-and/
4 Deutsches Museum, Spinnmaschine »Spinning Jenny«, Deutsches Museum Digital, https://digital.deutsches-museum.de/de/digital-catalogue/collection-object/25202/, https://de.wikipedia.org/wiki/Spinning_Jenny
5 https://de.wikipedia.org/wiki/Alfred_Krupp
6 Auch dritte industrielle Revolution
7 https://de.wikipedia.org/wiki/Sapere_aude
8 https://de.wikipedia.org/wiki/Landwirtschaftliche_Revolution
9 https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Eisenbahn
10 https://de.wikipedia.org/wiki/LEG_%E2%80%93_Adler_und_Pfeil

11 Kugler, M. (2010), »Fehleinschätzungen der Menschheit«, *Die Presse*, 28. Februar 2010, https://www.diepresse.com/543154/fehleinschaetzungen-der-menschheit Wobei für Menschen, die Jahrtausende nur Gehtempo – einige wenige dann vielleicht Reittempo, was dem heutigen Fahrradtempo entspricht – gewohnt waren, die plötzlich 10-fache Geschwindigkeit mit permanenter Veränderung von Sichtfeld und Perspektive an-fangs tatsächlich ein Problem war. Der Kulturwissenschaftler Wolf-gang Schivelbusch zitiert in seinem Buch Die Geschichte der Eisen-*bahnreise* entsprechende Berichte aus der Broschüre »The Influence of Railway Travelling on Public Health« (1862) der medizinischenachzeitschrift The Lancet zu diesem Phänomen. Darin wird vor Ermüdung, »materiellem Zerfall« und »organischer Veränderung der Substanz« gewarnt. Siehe Schivelbusch, W. (2000), Die Geschichte der Eisenbahnreise – Zur Industrialisierung von Raum und Zeit im 19. Jahrhundert, Frankfurt a. M.: Fischer

12 https://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_des_Ruhrgebiets

13 Gunkel, D. (2020), »Mensch oder Maschine«, *Spiegel Geschichte*, Nr. 4/2018, https://www.spiegel.de/geschichte/mensch-oder-maschine-a-0b29b9c5-0002-0001-0000-000158463436?context=issue

14 Behne, J. und T. Tippach (2014), »Industrialisierung«, Städte-geschichte-Portal der Universität Münster, 1. September 2014, https://www.uni-muenster.de/Staedtegeschichte/portal/einfuehrung/geschichte/industrialisierung.html Zwischen 1871 und 1914 wuchs die deutsche Bevölkerung um 58 % von 41 Mio. auf 65 Mio. Menschen.

15 Gunkel, D. (2020), »Mensch oder Maschine«, Spiegel Ge*schichte*, Nr. 4/2018, https://www.spiegel.de/geschichte/mensch-oder-maschine-a-0b29b9c5-0002-0001-0000-000158463436?context=issue

16 Pathologisches Institut der Universität Würzburg, Zellularpathologie. Virchow konzipiert die Zellularpathologie, https://www.pathologie.uni-wuerzburg.de/geschichte/virchow-in-wuerzburg/forschung/zellularpathologie/

17 https://de.wikipedia.org/wiki/Humoralpathologie#Mittelalter_und_Neuzeit

18 https://de.wikipedia.org/wiki/Kindersterblichkeit Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung, »Säuglingssterblichkeit in Deutschland« (1872–2023), https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Fakt/S10-Saeuglingssterblichkeit-ab-1872.html

19 https://de.wikipedia.org/wiki/William_Armstrong,_1._Baron_Armstrong

20 https://de.wikipedia.org/wiki/Kl%C3%A4ranlage

21 Ell, R. und H. Westram (2022), »Die Geschichte der Klimaforschung. Der Klimawandel ist schon lange bekannt«, ARD alpha, 5. Oktober 2022, https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/klimawandel-klimaforschung-geschichte-historisch-100.html

22 Marrah, M. (2022), »For 110 Years, Climate Change Has Been in the News – Are We Finally Ready to Listen?«, The Conversation,15. August 2022, https://theconversation.com/for-110-years-climate-change-has-been-in-the-news-are-we-finally-ready-to-listen-188646

23 European Parliament (2024), »Greenhouse Gas Emissions by Country and Sector (Infographic)«, 2. Dezember 2024, https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301STO98928/20180301STO98928_en.pdf

24 Ebd.; Umweltbundesamt (2024), »Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen«, 6. Mai 2024, https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (2020),»Zunehmender Einsatz von Stickstoffdünger bedroht Klimaziele«, 8. Oktober 2020, https://www.geomar.de/news/article/zunehmender-einsatz-von-stickstoffduenger-bedroht-klimaziele

25 Glaub, M. und C. Hall (2017), »Evolutionary Implications of Persistence Hunting: An Examination of Energy Return on Investment for !Kung-Hunting«, Human Ecology, Bd. 45, S. 393–401, https://link.springer.com/article/10.1007/s10745-017-9908-3

26 Rasul, K. et al. (2024), »Energy Input and Food Output: The Energy Imbalance across Regional Agrifood Systems«, PNAS *Nexus*, Bd. 3, Nr. 12, Dezember 2024, https://academic.oup.com/pnasnexus/article/3/12/pgae524/7919164. Mit Dank an Prof. Verena Winiwarter für ihren spannenden Vortrag bei der Academia Europaea in Wrocław, 2024

27 https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell

28 NDR (2022), »Die Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn«, 17. Dezember 2022, https://www.ndr.de/geschichte/chronologie/Die-Entdeckung-der-Kernspaltung-durch-Otto-Hahn,uranspaltung100.html

29 https://de.wikipedia.org/wiki/Chicago_Pile

30 https://de.wikipedia.org/wiki/Erster_atomarer_Zwischenfall_der_Geschichte https://de.wikipedia.org/wiki/Forschungsreaktor_Haigerloch

31 Gibbard, P. et al. (2022), »The Anthropocene as an Event, not an Epoch«, Journal of Quaternary Science, Bd. 37, Nr. 3, S. 395–399, https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jqs.3416

32 https://en.wikipedia.org/wiki/Tim_Berners-Lee

33 Manyika, J. und C. Roxburgh (2011), »The Great Transformer: The Impact of the Internet on Economic Growth and Prosperity«, McKinsley Global Institute, Oktober 2011, https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-great-transformer

34 UNCTAD (2024), »Digital Economy Report 2024 – Shaping an Environmentally Sustainable and Inclusive Digital Future«, https://unctad.org/publication/digital-economy-report-2024

35 Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025), »Internetnutzung«, 13. März

2025, https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/wissenschaft-technologie-digitales/Internetnutzung.html

36 Die Gaia-Hypothese besagt, dass man die Geologie, das Klima und die Biosphäre unseres Planeten als einen sich selbst regulierenden Superorganismus betrachten kann. https://de.wikipedia.org/wiki/Gaia-Hypothese

37 Nutanix (2023), »What Is a Digital Carbon Footprint & how Can You Reduce Yours?«, 27. Oktober 2023, https://www.nutanix.com/info/digital-carbon-footprint#definition

38 IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch In der letzten Version gibt es den AR6 Synthesis Report »Climate Change 2023«, aus dem wir die meisten Informationen beziehen: IPCC (2023), AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023, https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

39 Das Hockeyschläger-Diagramm geht zurück auf eine Publikation von Michael Mann, Raymond Bradley und Malcolm Hughes. https://de.m.wikipedia.org/wiki/Hockeyschl%C3%A4ger-Diagramm

40 Stainforth T. und B. Brzezinski (2020), »More Than Half of All CO_2 Emissions since 1751 Emitted in the last 30 Years«, Institute for European Environmental Policy (IEEP), 29. April 2020, https://ieep.eu/news/more-than-half-of-all-co2-emissions-since-1751-emitted-in-the-last-30-years/

41 Copernicus Climate Change Service, »Climate Indicators: Temperature«, https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/temperature

42 Otto F. et al. (2023), »Climate Change Increased Extreme Monsoon Rainfall, Flooding Highly Vulnerable Communities in Pakistan«, Climate Analytics, 17. März 2023, https://climateanalytics.org/publications/climate-change-increased-extreme-monsoon-rainfall-flooding-highly-vulnerable-communities-in-pakistan

43 Kegel, B. (2021), Die Natur der Zukunft: Tier- und Pflanzenwelt in Zeiten des Klimawandels, Köln: Dumont SWR-Podcast »Die Zukunft der Natur – Wie sich Tiere und Pflanzen im Klimawandel verändern«, https://open.spotify.com/episode/1QEg8X3eXKDooYWHxvTogu?si=-1392d65ea0b6446a

44 https://de.m.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental_Platform_on_Biodiversity_and_Ecosystem_Services

45 The Cenozoic CO_2 Proxy Integration Project (CenCO_2PIP) Consortium (2023), »Toward a Cenozoic History of Atmospheric CO_2: The Cenozoic CO_2 Proxy Integration Project (CenCO_2PIP)«, *Science*, Bd. 382, Nr. 6675, 8. Dezember 2023, https://www.science.org/doi/10.1126/science.adi5177

46 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2022), »Carbon Dioxide now more than 50 % Higher than Pre-Industrial Le-

vels«, NOAA Newsroom, 3. Juni 2022, https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels

47 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), »Trends in Atmospheric Carbon Dioxide – Monthly Average, NOAA Global Monitoring Laboratory«, https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html

48 The Royal Society (2020), »Is the Current Level of Atmospheric CO_2 Unprecedented in Earth's History?«, März 2023, https://royalsociety. org/news-resources/projects/climate-change-evidence-causes/question-7/

49 Anthesis Group (2021), »Five Future Scenarios AR6 IPCC«, https://www.anthesisgroup.com/insights/five-future-scenarios-ar6-ipcc/ Bildungsserver Hamburg, Das Klima der SSP-Szenarien, https://bildungsserver.hamburg.de/themenschwerpunkte/klimawandel-und-klimafolgen/klimawandel/ssp-szenarien-klima-746790

50 Die sogenannten C_4-Pflanzen, die einen besonders effizienten Mechanismus zur Verarbeitung des weniger gewordenen Kohlendioxids entwickelt hatten.

51 Knud Jahnke auf Mastodon Social, https://mastodon.social/@knud/113714706727620953

52 Tagesschau (2024), »Grönland: Eisschmelze beschleunigt sich dramatisch«, 25. Dezember 2024, https://www.tagesschau.de/wissen/klima/groenland-eisschmelze-100.html

53 Davies, B. (2023), »Calculating Glacier Ice Volumes and Sea Level Equivalents«, AntarcticGlaciers, 6. September 2023, https://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/estimating-glacier-contribution-to-sea-level-rise/

54 Der Kölner Dom steht c.a. 60 m über dem Meeresspiegel. Das Antarktische Eis würde das Wasser also bis zu den Stufen ansteigen lassen. Dazu kommen aber noch die 7 Meter Steigung des Grönlandeises, plus Gletscher und andere. Damit kommt man letztlich auf rund 70 Meter. Damit wären die rund 5 Meter hohen Türen des Petersportals ohne hohe Dämme wohl metertief unter Wasser. https://www.zdfheute.de/wissen/gletscher-schmelzen-klimawandel-gedankenexperiment-100.html

55 E-Education, »Sea Level in the Past 20 000 Years«, https://www.e-education.psu.edu/earth107/node/1506

56 Gavin (2025), »Comparison Update 2024«, RealClimate, 27. Januar 2025, https://www.realclimate.org/index.php/archives/2025/01/comparison-update-2024/ Via Stefan Rahmstorf auf Fedscience, 18. Februar 2025, https://fediscience.org/@rahmstorf/114024501955611502

57 Kaufmann, T. (2024), Der Bauernkrieg. Ein Medienereignis, Herder, Freiburg, Borée, S. 19; »Bauernkrieg als Baby des Buchdrucks«, Evangelisches Sonntagsblatt, 21. Oktober 2024, https://www.evangelisches-sonntagsblatt.de/2024/10/21/bauernkrieg-als-baby-des-buchdrucks/

58 Wir hatten einige Diskussionen im Team, ob man einen moralischen Begriff wie »lügen« hier gebrauchen darf, aber die Dienste sind so programmiert, dass sie den Usern gefallen sollen, und wir werden scheinbar gerne angelogen. Hier ein Beispiel, bei dem Amanda Guinzburg ChatGPT in ein Gespräch verwickelt. Die KI lobt ihren Text über den grünen Klee, ohne ihn gelesen zu haben. Immerhin gibt ChatGPT die Lüge zu – noch. https://amandaguinzburg.substack.com/p/diabolus-ex-machina

59 Blume, M. (2025), »Von der Neurohacking-Blase zum KI-Kokon – oder zur dialogischen Realität«, SciLogs – Natur des Glaubens, 18. Januar 2025, https://scilogs.spektrum.de/natur-des-glaubens/von-der-neurohacking-blase-zum-ki-kokon-oder-zur-dialogischen-realitaet/

60 https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Länder_nach_Bruttoinlandsprodukt

61 Slobodian, Q. (2019), Globalisten. Das Ende der Imperien und die Geburt des Neoliberalismus, Berlin: Suhrkamp Lüpke, M. (2025), »USA unter Donald Trump und Elon Musk: ›Etwas für Weicheier und Feiglinge‹, Interview mit Quinn Slobodian«, t-on-line, 22. Januar 2025, https://www.t-online.de/nachrichten/ausland/usa/id_100572968/usa-unter-donald-trump-und-elon-musk-etwas-fuer-weicheier-und-feiglinge-.html

62 CEO = Chief Executive Officer – Geschäftsführer

63 Citigroup (2024), »The Rise of AI Robots, Physical AI is Coming for You«, 5. Dezember 2024, https://www.citigroup.com/global/insights/the-rise-of-ai-robots

64 Die Konferenz war »Synapse 2025« in New Delhi. Die Roboter-Verfassung geht wahrscheinlich auf Google zurück; Katz, L. (2024), »Google Crafts ›Robot Constitution‹ Inspired by Isaac Asimov's Laws of Robotics«, Forbes, 10. Januar 2024, https://www.forbes.com/sites/lesliekatz/2024/01/10/google-robot-constitution-inspired-by-asimov-declares-bots-cant-hurt-humans/

65 ET Online (2024), »Elon Musk's ›New World‹ Mission: How Mars Could Become Humanity's Next Frontier«, The Economic Times, 27. Dezember 2024, https://economictimes.indiatimes.com/news/international/global-trends/elon-musks-new-world-mission-how-mars-could-become-humanitys-next-frontier/articleshow/116707274. cms

66 ClimateAdam (2022), »Musk & Mars won't save us from Climate Change«, YouTube, 3. Februar 2022, https://youtu.be/hk1rSaLqHsY

67 https://en.wikipedia.org/wiki/Antimatter_rocket

68 Die Leistung beim Start ist 12 GW für 2 Minuten, was 70 % der Gesamtleistung ist und insgesamt 2×1012 Joule ergibt und 22 mg c2 entspricht; The Physics Factbook, »Power of a Space Shuttle«, https://hypertextbook.com/facts/2001/StaverieBoundouris.shtml

69 Gibney, E. (2024), »Antimatter to Be Transported Outside a Lab for First Time – in a Van«, *Nature*, 26. November 2024, https://www.nature.com/articles/d41586-024-03841-0

70 University of Cambridge (2016), »Disbelieve It or Not: Ancient History Suggests that Atheism Is as Natural to Humans as Religion«, 16. Februar 2016, https://www.cam.ac.uk/research/news/disbelieve-it-or-not-ancient-history-suggests-that-atheism-is-as-natural-to-humans-as-religion

71 Weimer, W. (2024), »Das Christentum wächst global überraschend stark«, n-tv, 31. März 2024, https://www.n-tv.de/politik/politik_person_der_woche/Das-Christentum-waechst-global-ueberraschend-stark-article24610462.html

72 Jesus.ch (2024), »Gen Z, die deutlich spirituellere Generation«, 8. Januar 2024, https://www.jesus.ch/themen/glaube/29007_gen_z_die_deutlich_spirituellere_generation Centraal Bureau voor de Statistiek (2025), »Daling aandeel mensen dat aangeeft bij religie te horen stagneert«, CBS, 18. April 2025, https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2025/16/daling-aandeel-mensen-dat-aangeeft-bij-religie-te-horen-stagneert Siehe auch Kommentar und Links des Missiologen Stefan Paas von der VU Amsterdam Ende April 2025 auf LinkedIn: https://www.linkedin.com/posts/stefan-paas-51373a5_daling-aandeel-mensen-dat-aangeeft-bij-religie-activity-7318932385134219264-dCks

73 InTeGrate, »Sea Level in the Past 20 000 Years«, https://www.e-education.psu.edu/earth107/node/1506

74 El-Menouar, Y. (2022), »Die religiöse Landschaft in Europa«, Experteninitiative Religionspolitik, 14. Januar 2022, https://www.experteninitiative-religionspolitik.de/blog/die-religioese-landschaft-in-europa/

75 Ein Beispiel für die Teilung zwischen traditionell evangelikalen Kreisen und den Trump-Evangelikalen sieht man in diesem Leit-artikel von Christianity Today, einer Zeitung, die vom Evangelisten Billy Graham gegründet wurde, während sein Sohn die Trommel für Trump rührt. Galli, M. (2019), »Trump Should Be Removed from Office«, Christianity Today, 19. Dezember 2019, https://www.christianitytoday.com/2019/12/trump-should-be-removed-from-office/

76 SWR Kultur (2025), »Ideologiegeschichte des Silicon Valley – Von Flower Power bis Elon Musk«, 16. März 2025, https://www.swr.de/swr-kultur/wissen/ideologiegeschichte-des-silicon-valley-von-flower-power-bis-elon-musk-das-wissen-2025-03-16-100.html Groß, M. (2014), »›Wir sind wie Götter und wir können genauso gut werden‹. Die Hippies und der Cyberspace«, Deutschlandfunk, 25. November 2014, https://assets.deutschlandfunk.de/FILE_593c919931f7636dc49000ec79a557d1/original.pdf

77 Strobl, N. (2025), »›Freedom Cities‹: Der Traum von den Sklavenstädten«, Moment.at, 10. März 2025, https://www.moment.at/story/freedom-cities-sklavenstaedte/

78 Menhard, E. (2023), »Longtermismus: Eine merkwürdige und sonder bare Ideologie«, netzpolitik.org, 30. April 2023, https://netzpolitik.org/2023/longtermismus-eine-merkwuerdige-und-sonderbare-ideologie/

https://de.wikipedia.org/wiki/Longtermism https://de.wikipedia.org/wiki/ Utilitarismus Nordmann, L. (2021), »Longtermism: Eine neue Theorie für die Zukunft?«, Philosophie Magazin, 2. September 2021, https://www.philomag.de/artikel/longtermism-eine-neue-theorie-fuer-die-zukunft

79 Menhard, E. (2024), »Longtermismus: Die KI-Religion der Tech-Barone«, netzpolitik.org, 30. Dezember 2024, https://netzpolitik.org/2024/longtermismus-die-ki-religion-der-tech-barone/

80 ET Online (2024), »Elon Musk's ›New World‹ Mission: How Mars Could Become Humanity's Next Frontier«, The Economic Times, 27. Dezember 2024, https://economictimes.indiatimes.com/news/international/global-trends/elon-musks-new-world-mission-how-mars-could-become-humanitys-next-frontier/articleshow/116707274. cms

81 https://en.wikipedia.org/wiki/Frank_J._Tipler

82 Lüpke, M. (2025), »Wir sollten uns auf das Schlimmste vorbereiten«, Interview mit Eric H. Cline, t-online, 12. Mai 2025, https://www.t-online.de/nachrichten/ausland/krisen/id_100683192/klimakrise-krieg-und-pandemie-auf-das-schlimmste-vorbereiten-.html Cline, E. H. (2015), 1177 v. Chr. Der erste Untergang der Zivilisation, Freiburg i. Br.: Theiss in Herder.

83 erf Medien (2022), »Zukunftsforscher Andreas Krafft über Hoffnung und Sehnsucht«, 29. November 2022, https://erf-medien.ch/radio/zukunftsforscher-andreas-krafft-ueber-hoffnung-und-sehnsucht/

84 International Renewable Energy Agency (2024), »Record Growth Drives Cost Advantage of Renewable Power«, 24. September 2024, https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Sep/Record-Growth-Drives-Cost-Advantage-of-Renewable-Power

85 International Renewable Energy Agency (2024), »Renewable Power Generation Costs in 2023«, September 2024, https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023

86 Suisse Éole (2024), »Kosten von Wind- und Solarstrom sinken weiter – Atom-, Kohle- und Gasstrom deutlich teurer«, Suisse Éole, 24. Juni 2024, https://suisse-eole.ch/de/news/kosten-von-wind-und-solarstrom-sinken-weiter-atom-kohle-und-gasstrom-deutlich-teurer/

87 Podcast »De Ongelooflijke Podcast« (2025), Folge 227, »We staan aan de vooravond van de grootste verandering ooit«, 4. Januar 2025, https://open.spotify.com/episode/2qeu3ksHxUHH76z0WpQ9sZ?si=8 dRP-CvGoQ9e5YDfDoMfZKg

88 Tagesschau (2024), »Weltbevölkerung wächst bis 2084 weiter«, 11. Juli 2024, https://www.tagesschau.de/ausland/weltbevoelkerung-prognose-un-100.html

89 Stutte, H. (2025), »Wir werden weniger«, Kölner Stadt-Anzeiger/*RND*, 30. 01. 2025; Klingholz, R. (2021), »Zu viel für diese Welt – Wege aus der doppelten Überbevölkerung«, Edition Körber, Hamburg

90 Podcast »Hotel Matze« (2024), »Zukunftsforscherin Florence Gaub – Wem gehört die Zukunft?«, 3. Juli 2024, https://open.spotify.com/episode/5gPKGuGbUAbIXtJO9iBrVY?si=fd3b31f1a3754cb8

91 Barker, S. et al. (2025), »Distinct Roles for Precession, Obliquity, and Eccentricity in Pleistocene 100-kyr Glacial Cycles«, *Science*, Bd. 387, Nr. 6674, 28. Februar 2025, https://open.spotify.com/episode/5gPKGuGbUAbIXtJO9iBrVY?si=afddebb920774936

92 Amos, J. (2016), »Carbon Emissions ›Pospone Ice Age‹«, BBC, 13. Januar 2016, https://www.bbc.com/news/science-environment-35307800 https://www.pik-potsdam.de/en/news/latest-news/human-made-climate-change-suppresses-the-next-ice-age Ganopolski, A., R. Winkelmann und H. J. Schellnhuber (2016), »The Role of Anthropogenic Forcing in the Delayed Onset of the Next Glacial Cycle«, *Nature*, Bd. 529, S. 200–203, https://www.nature.com/articles/nature16494

93 Wolff, E. W. et al. (2023), »Frequency of Large Volcanic Eruptions over the Past 200 000 Years«, European Geosciences Union, Bd. 19, Nr. 1, 6. Januar 2023, https://cp.copernicus.org/articles/19/23/2023/

94 https://en.wikipedia.org/wiki/Yellowstone_Caldera

95 University of Wyoming (2025), »UW and USGS Science Team Dis-cover Temporal Relationship between Basaltic Volcanism and Yellow-stone's Rhyolitic Eruptions«, 25. April 2025, https://www.uwyo.edu/news/2025/04/uw-and-usgs-science-team-discover-temporal-relationship-between-basaltic-volcanism-and-yellowstones-rhyolitic-eruptions.html

96 Kuta, S. (2025), »Will Yellowstone Erupt Soon? Scientists Are Using New Techniques to Find Out«, Smithsonian Magazine, 6. Januar 2025, https://www.smithsonianmag.com/smart-news/will-yellowstone-erupt-soon-scientists-are-using-new-techniques-to-find-out-180985771/ Bennington, N. et al. (2025), »The Progression of Basaltic–Rhyolitic Melt Storage at Yellowstone Caldera«, *Nature*, Bd. 637, S. 98–103, https://www.nature.com/articles/s41586-024-08286-z

97 Köhler, B. (2024), »Supervulkan in Italien & Co.: Neue Analyse weckt Zweifel«, Berliner Morgenpost, 15. März 2024, https://www.morgenpost.de/vermischtes/article241890842/Studie-weckt-Zweifel-am-grossen-Klimakuehler-Supervulkan.html

98 DeMets, C., R. G. Gorden und J.-Y. Royer (2005), »Motion between the Indian, Capricorn and Somalian Plates since 20 Ma: Implications for the Timing and Magnitude of Distributed Lithospheric Deformation in the Equatorial Indian Ocean«, Geophysical Journal International, Bd. 161, Nr. 2, S. 445–468, https://academic.oup.com/gji/article/161/2/445/1994846?login=false Stamps, D. S. et al. (2008), »A Kinematic Model for the East African Rift«, Geophysical Research Letters, Bd. 35, Nr. 5, März 2008, https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2007GL032781 Ivits, E. (2025), »Ein Kontinent zerbricht – schneller als gedacht«, t-online, 20. Mai 2025, https://www.t-online.

de/nachrichten/panorama/wissen/id_100564970/afrika-bricht-auseinander-ein-kontinent-zerbricht-ein-ozean-entsteht.html Amazouz, L. (2024), »Africa Is Splitting Apart: A New Ocean Is Forming Faster than Anyone Predicted«, The Daily Galaxy, 30. De-zember 2024, https://dailygalaxy.com/2024/12/africa-splitting-new-ocean-forming-faster/ Pérez Díaz, L. (2018), »Africa Is Splitting in Two – Here Is why«, *The* Conversation, 29. März 2018, https://theconversation.com/africa-is-splitting-in-two-here-is-why-94056

99 Howard, B. C. (2016), »Australia Is Drifting so Fast GPS Can't Keep Up«, National Geographic, 23. September 2016, https://www.nationalgeographic.com/science/article/australia-moves-gps-coordinates-adjusted-continental-drift

100 https://de.wikipedia.org/wiki/Amasien Geology Bites, »David Evans on Supercontinents«, https://www.geologybites.com/david-evans

101 Geology Bites, »Dietmar Müller on Reconstructing Plate Motions over a Billion Years of Earth History«, https://www.geologybites.com/dietmar-muller

102 https://de.wikipedia.org/wiki/Alpidische_Orogenese

103 https://en.wikipedia.org/wiki/Pangaea_Proxima

104 Neron de Surgy, O. und J. Laskar (1997), »On the Long Term Evolution of the Spin of the Earth«, Astronomy and Astrophysics, Bd. 318, S. 975–989, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997A&A...318..975N

105 Evans, D. A. D. (2003), »True Polar Wander and Supercontinents«, Tectonophysics, Bd. 362, S. 303–320, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003Tectp.362..303E

106 Kasting, J. F. (1988), »Runaway and Moist Greenhouse Atmospheres and the Evolution of Earth and Venus«, *Icarus*, Bd. 74, S. 472–494, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988Icar...74..472K Laughlin, G. P. (2007), »From Here to Eternity – The Fate of the Sun and the Earth«, Sky and Telescope, Juni 2007, S. 32

107 De Sousa Mello, F. und A. C. Santos Friaça (2020), »The End of Life on Earth is not the End of the World: Converging to an Estimate of Life Span of the Biosphere?«, International Journal of Astrobiology, Bd. 19, S. 25–42, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020IJAsB..19...25D

108 Siegel, E. (2025), »No, we Can't Geoengineer our Way out of the Climate Crisis«, Big Think, 12. Februar 2025, https://bigthink.com/starts-with-a-bang/cant-geoengineer-climate-crisis/

109 RAG-Stiftung, »Ewigkeitsaufgaben«, https://www.rag-stiftung.de/ewigkeitsaufgaben/

110 Mulligan, J. et al. (2023), »6 Ways to Remove Carbon Pollution from the Atmosphere«, World Resources Institute, 17. März 2023, https://www.wri.org/insights/6-ways-remove-carbon-pollution-sky

111 Max-Planck-Gesellschaft (2024), »Wie geht es dem Ozonloch?«, 10. September 2024, https://www.mpg.de/ozonloch

112 Eine größere Liste möglicher zukünftiger Entwicklungen findet sich hier: https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_the_far_future und https://en.wikipedia.org/wiki/Future_of_Earth

113 Florida Museum of Natural History (2024), »Yearly Worldwide Shark Attack Summary«, International Shark Attack File, https://www.floridamuseum.ufl.edu/shark-attacks/yearly-worldwide-summary/

114 ESA (2025), »Asteroids and Planetary Defence«, https://www.esa.int/Space_Safety/Planetary_Defence/Asteroids_and_Planetary_Defence NASA, »Planetary Defense«, NASA Science, https://science.nasa. gov/planetary-defense/

115 ESA, »Risk List – Near-Earth Objects«, https://neo.ssa.esa.int/risk-list

116 https://de.wikipedia.org/wiki/(99942)_Apophis

117 Tingley, B. (2024), »Tiny Asteroid Detected Hours before Hit-ting Earth to Become 4th ›Imminent Impactor‹ of 2024«, *Space*, 3. Dezember 2024, https://www.space.com/the-universe/asteroids/tiny-asteroid-detected-hours-before-hitting-earth-to-become-4th-imminent-impactor-of-2024

118 https://rubinobservatory.org/news/rubin-first-look/swarm-asteroids

119 Markus 13,24b–25 (Lutherbibel)

120 Im Gegensatz zu »Amateur-Astronomen«, was bedeutet, dass jemand die Beobachtungen nicht beruflich macht, aber viele Amateure haben inzwischen sehr professionelle Teleskope.

121 Lawler, D. (2024), »Starless and forever alone: More ›Rogue‹ Planets Discovered«, Phys.org, 29. Mai 2024, https://phys.org/news/2024-05-starless-rogue-planets.html Martín, E. L. et al. (2025), »Euclid: Early Release Observations – A Glance at Free-floating Newborn Planets in the σ Orionis Cluster«, Astronomy and Astrophysics, Bd. 697, Art.-Nr. A7, https://ui.adsabs. harvard.edu/abs/2025A&A...697A...7M

122 Experten reden auch von einem metastabilen Zustand, denn die Entwicklung der Positionen der Planeten verläuft schon nach einigen Millionen Jahren chaotisch, allerdings nicht so stark, dass Planeten leicht hinausgeschleudert werden könnten. Siehe Sussman, G. J. und J. Wisdom (1992), »Chaotic Evolution of the Solar System«, *Science*, Bd. 257, S. 56–62 Mogavero, F. und J. Laskar (2021), »Long-Term Dynamics of the inner Planets in the Solar System«, Astronomy and Astrophysics, Bd. 655, Art.-Nr. A1, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021A&A...655A...1M

123 Mamajek, E. E. et al. (2015), »The Closest Known Flyby of a Star to the Solar System«, The Astrophysical Journal, Bd. 800, Art.-Nr. L17, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJ...800L..17M de la Fuente Marcos, R. und C. de la Fuente Marcos (2022), »The Closest Past Flyby of a Known Star to the Solar System: HD 7977, UCAC4 237-008148 or WISE J072003.20-084651.2?«, *Research* Notes of the American Astronomical Society, Bd. 6, Art.-Nr. 152, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022RNAAS...6..152D

124 https://de.wikipedia.org/wiki/Oortsche_Wolke

125 Für Freunde der Einheiten: Das sind ein halber Parsec bzw. 1,6 Lichtjahre oder 150 Billionen Kilometer.

126 Darma, R., W. Hidayat und M. I. Arifyanto (2019), »Tracing Stellar Close Encounters with Our Sun from GAIA DR2, LAMOST DR4, and RAVE DR5 Catalogues«, Journal of Physics Conference *Series*, Bd. 1245, Art.-Nr. 012028, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019JPhCS1245a2028D

127 Bobylev, V. V. und A. T. Bajkova (2021), »Study of Close Stellar Encounters with the Solar System Based on Data from the Gaia EDR3 Catalogue«, Astronomy Letters, Bd. 47, S. 180–187, https://ui.adsabs. harvard.edu/abs/2021AstL...47..180B Bailer-Jones, C. A. L. et al. (2018), »New Stellar Encounters Discovered in the Second Gaia Data Release«, Astronomy and Astrophysics, Bd. 616, Art.-Nr. A37, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018A&A...616A..37B

128 Raymond, S. N. et al. (2024), »Future Trajectories of the Solar System: Dynamical Simulations of Stellar Encounters within 100 au«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 527, S. 6126–6138, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024MNRAS.527.6126R

129 Schröder, K.-P. und R. C. Smith (2008), »Distant Future of the Sun and Earth Revisited«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 386, S. 155–163, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.386..155S Christensen-Dalsgaard, J. (2021), »Solar Structure and Evolution«, Living Reviews in Solar Physics, Bd. 18, S. 2, https://arxiv.org/abs/2007.06488

130 Tusay, N. et al. (2025), »A Disintegrating Rocky World Shrouded in Dust and Gas: Mid-IR Observations of K2-22b Using JWST«, arXiv E-prints, arXiv:2501.08301, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025arXiv250108301T

131 Villaver, E. und M. Livio (2007), »Can Planets Survive Stellar Evolution?«, The Astrophysical Journal, Bd. 661, S. 1192–1201, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2007ApJ V Schröder und Smith meinen sogar, dass das noch eher pessimis-tisch geschätzt ist und auch geringere Abstände die Erde als heißen Felsen instand ließen; siehe Schröder, K.-P. und R. C. Smith (2008), »Distant Future of the Sun and Earth Revisited«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 386, S. 155–163, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.386..155S

132 Korycansky, D. G., G. Laughlin und F. C. Adams (2001), »Astronomical Engineering: A Strategy for Modifying Planetary Orbits«, Astro-physics and Space Science, Bd. 275, S. 349–366, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001Ap&SS.275..349K

133 https://de.wikipedia.org/wiki/Swing-by

134 Debes, J. H. und S. Sigurdsson (2002), »Are There Unstable Planetary Systems around White Dwarfs?«, The Astrophysical Journal, Bd. 572, S. 556–565, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002ApJ...572..556D

135 Bei Weißen Zwergen liegt die habitable Zone bei Temperaturen über 5000° für rund 7 Milliarden Jahre noch gerade außerhalb des Radius, bei dem Gezeitenkräfte den Planeten zerreißen würden. Siehe Agol, E. (2011), »Surveys for Earths in the Habitable Zones of White Dwarfs«, The Astrophysical Journal, Bd. 731, Art.-Nr. L31, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011ApJ...731L..31A Whyte, C. T., L. H. Quiroga-Nuñez, M. Lingam und P. Pinilla (2024), »Potential for Life to Exist and be Detected on Earth-like Planets Orbiting White Dwarfs«, The Astrophysical Journal, Bd. 977, Art.-Nr. L38, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024ApJ...977L..38W (Mit Dank an Jan van Roestel für den Hinweis)

136 Zink, J. K., K. Batygin und F. C. Adams (2020), »The Great Inequality and the Dynamical Disintegration of the Outer Solar System«, The Astronomical Journal, Bd. 160, Art.-Nr. 232, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020AJ 160..232Z

137 Sobral, D. et al. (2013), »A Large Hα Survey at z = 2.23, 1.47, 0.84 and 0.40: the 11 Gyr Rvolution of Star-Forming Galaxies from HiZELS★«, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 428, S. 1128–1146, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013MNRAS.428.1128S

138 https://en.wikipedia.org/wiki/Future_of_an_expanding_universe

139 van der Marel, R. P. et al. (2012), »The M31 Velocity Vector. III. Future Milky Way M31-M33 Orbital Evolution, Merging, and Fate of the Sun«, The Astrophysical Journal, Bd. 753, Art.-Nr. 9, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012ApJ...753. V Eine neuere Arbeit sagt allerdings, dass die Wahrscheinlichkeit einer Verschmelzung in 10 Ga kleiner als 50% ist. Auf längere Sicht scheint sie mir aber unvermeidlich: Sawala, T. et al. (2025), »No certainty of a Milky Way–Andromeda collision«, Nature Astronomy, doi: 10.1038/s41550-025-02563-1 https://www.nature.com/articles/s41550-025-02563-1

140 Durch das Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher entsteht ein schnell rotierendes größeres Loch. Durch die Galaxienkollision wird Gas zum Zentrum transportiert, rotiert um das Schwarze Loch, wird dadurch extrem aufgeheizt und lässt es so strahlen.

141 Busha, M. T. et al. (2003), »Future Evolution of Cosmic Structure in an Accelerating Universe«, The Astrophysical Journal, Bd. 596, S. 713–724, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003ApJ...596..713B

142 Ebd.

143 van Tent, B., P. C. M. Delgado und R. Durrer (2023), »Constraining the Bispectrum from Bouncing Cosmologies with Planck«, Physical Review Letters, Bd. 130, Art.-Nr. 191002, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023PhRvL.130s1002V

144 Weiße Zwerge werden tatsächlich irgendwann zu so etwas wie riesigen Diamanten. Siehe Pappas, S. (2023), »This Collapsed Star Is Turning into an Gigantic Diamond before our Eyes«, *Space*, 14. Juni 2023, https://www.space.com/collapsed-star-gigantic-diamond

145 Die gesamte baryonische Ruhemasse von Milchstraße und Andromeda umfasst maximal 400 × 109 Sterne. Die Gesamtenergie Mbarc² ist dann 7×1056 erg, geteilt durch 2 × 2000 kcal/Tag, ergibt dann 1049 Jahre. Das stimmt nicht genau, die 2000 kcal sind eigentlich ein Marketing-Gag aus den USA. Bei jedem Menschen ist das individuell anders. Menschen verbrauchen in den am meisten entwickelten Zivilisationen rund hundertmal mehr Energie für Industrie, Heizung und andere Technologien – um die 100 000 kWh pro Jahr.

146 Krauss, L. M. und G. D. Starkman (2000), »Life, the Universe, and Nothing: Life and Death in an Ever-expanding Universe«, The Astrophysical Journal, Bd. 531, S. 22–30, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000ApJ...531...22K

147 Abe, K. et al. (2017), »Search for Proton Decay via $p \to e+\pi 0$ and $p \to \mu+\pi 0$ in 0.31 Megaton·Years Exposure of the Super-Kamio-kande Water Cherenkov Detector«, Physical Review D, Bd. 95, 6. Januar 2017, https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.95.012004

148 *Spektrum*, »Hawking-Strahlung«, https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/hawking-strahlung/169

149 https://en.m.wikipedia.org/wiki/Precision_tests_of_QED

150 Das Bild der aneinanderstoßenden Glöckchen ist vielleicht zu weit hergeholt, aber es geht darum, dass Teilchen und Anti-Teilchen gleichzeitig entstehen.

151 Finanzierung durch die »Nationale Wetenschapsagenda« (NWA) der niederländischen Förderorganisation NWO

152 Wondrak, M. F., W. D. van Suijlekom und H. Falcke (2023), »Gravita-tional Pair Production and Black Hole Evaporation«, Physical Review Letters, Bd. 130, Art.-Nr. 221502, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023PhRvL.130v1502W

153 Eine solche Vermutung stand schon in meinem Buch Licht im Dunkeln.

154 Ferreiro, A., J. Navarro-Salas und S. Pla (2024), »Comment on ›Gravitational Pair Production and Black Hole Evaporation‹«, Physical Review Letters, Bd. 133, Art.-Nr. 229001, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024PhRvL.133v9001F Wondrak, M. F., W. D. van Suijlekom und H. Falcke (2023), »Gravitational Pair Production and Black Hole Evaporation«, Physical Review Letters, Bd. 130, Art.-Nr. 221502, https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023PhRvL.130v1502W

155 Falcke, H., M. F. Wondrak und W. D. van Suijlekom (2025), »An Upper Limit to the Lifetime of Stellar Remnants from Gravita-tional Pair Production«, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, Bd. 2025, Art.-Nr. 023,https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2025JCAP...05..023F

156 Hoffman, M. (2013), »Higgs Boson Will Destroy the Universe Eventually«, Science World Report, 19. Februar 2013, http://www.scienceworldreport.com/articles/5038/20130219/higgs-boson-instability-will-destroy-universe-eventually.htm Sutter, P. (2021), »Here's How the Universe Could

End in a ›False Vacuum Decay‹«, *Space*, 8. Dezember 2021, https://www.space.com/universe-end-false-vacuum-decay Davis, M. (2019), »How ›Vacuum Decay‹ Could End the Universe«, Big Think, 1. Januar 2019, https://bigthink.com/hard-science/vacuum-decay-end-of-the-universe/

157 Podcast »Why This Universe?«, Folge 59, »The End of Everything (Ft. Katie Mack)«, https://open.spotify.com/episode/1ffHtrrheWjUCQhu4fiUZo?si=-SbjCepLRyubhULDAlEFxQ

158 https://articles.adsabs.harvard.edu//full/2001MitAG..84..817./0000819.000.html – der Satz ist aus dem Gedächtnis zitiert und nicht wörtlich wiedergegeben.

159 Steinhardt, P. J. (2008), »A Recycled Universe«, Scientific American, 1. April 2008, https://www.scientificamerican.com/article/a-recycled-universe/ Siehe auch Mack, K. (2020), The End of Everything (Astrophysically *Speaking)*, New York: Scribner

160 Offenbarung 21, 1-2b (Lutherbibel)

161 Psalm 90, 12 (Lutherbibel).

162 https://de.wikipedia.org/wiki/Theogonie

163 Berman, B. (2019), »The Ever-Lasting Question: More Sand or Stars?«, Astronomy Magazine, 23. Januar 2019, https://www.astronomy.com/science/the-ever-lasting-question-more-sand-or-stars/ Ich kam in einer eigenen Schätzung einmal zum selben Ergebnis, aber die Zahl ist natürlich nur sehr grob geschätzt. Die Frage ist unter manchen Astronomen so umstritten wie unter mittelalterlichen Denkern die Frage, wie viele Engel auf eine Nadelspitze passen (wo-bei die Behandlung dieser Frage im Mittelalter nicht nachgewiesen ist und wohl eine der vielen nachträglichen Projektionen auf diese Zeit ist). Der Punkt ist, dass die Größenordnung der Größenordnung vergleichbar ist. Wer es nicht glaubt, darf gerne mal Sandkörner zählen – deren Zahl ist noch am unsichersten. Siehe Plait, P. (2022), »Do Stars Outnumber the Sands of Earth's Beaches?«, Scientific Ameri-*can*, 12. Oktober 2022, https://www.scientificamerican.com/article/do-stars-outnumber-the-sands-of-earths-beaches/

164 Schüring, J. (2003), »Wie viele Zellen hat der Mensch?«, *Spektrum*, 27. Juli 2003, https://www.spektrum.de/frage/wie-viele-zellen-hat-der-mensch/620672

165 von Mirbach, J. (2021), »Nützliche Erreger – Gute Viren, schlechte Viren«, SRF school, 1. Februar 2022, https://www.3sat.de/wissen/wissenschaftsdoku/210204-viren-wido-102.html Blech, J. (2025), »Wie uns Viren helfen können«, *Der Spie*gel, Bd. 18/2025, https://www.spiegel.de/wissenschaft/medizin/mikrobiologie-billionen-von-viren-leben-auf-dem-menschen-und-halten-ihn-gesund-a-880b0499-5102-4c67-971b-16d16da44e47

166 New Scientist (2007), »Who Is the Most Refined Ape of Them All?«, Bd. 194, Nr. 2600, S. 17, doi:10.1016/S0262-4079(07)60972-5

167 wissen.de, »Menschenaffe und Mensch: eng verwandt«, https://www.wissen.de/bildwb/menschenaffe-und-mensch-eng-verwandt
168 Ellis, G. F. R. (2023), »How Purposeless Physics Underlies Purposeful Life«, *Nature*, 4. Oktober 2023, https://www.nature.com/articles/d41586-023-03061-y?utm_source=press.coop
169 Wong, M. L. et al. (2023), »On the Roles of Function and Selection in Evolving Systems«, PNAS, Bd. 120, Nr. 41, 16. Oktober 2023, https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2310223120
170 Mann, M. (2023), »Our Fragile Moment – How Lessons from Earth's Past Can Help Us Survive the Climate Crisis«, New York: Public Affairs
171 Genesis 1, 28 (Lutherbibel)
172 Mack, U. (2013), »Macht euch die Erde untertan«, ERF Plus – Wort zum Tag, 8. Juli 2013, https://www.erf.de/hoeren-sehen/erf-plus/audiothek/wort-zum-tag/macht-euch-die-erde-untertan/73-3531
173 Brudereck, C. (2024), Trotzkraft, Essen: 2Flügel Verlag, und Veranstaltung beim Evangelischen Kirchentag in Hannover am 2. Mai 2025.