

Rare Biosphere – eine verborgene Quelle

Thomas Hardtmuth

«Die Kräfte, die im Makrokosmos zu beobachten sind, wirken bis in das Zellige hinein. Und das, was in den Zellen wirkt, ist im Grunde genommen nichts anderes als ein Abbild dieser makrokosmischen Wirkung.»

(Steiner 1922, GA 312)

Unter «rare biosphere» verstehen wir heute die (extrem) seltenen Arten innerhalb mikrobieller Gemeinschaften. Ihre Bedeutung für die Multifunktionalität, Stoffwechseldynamik, Stresstoleranz und damit für die Gesundheit und «Lebendigkeit» von Ökosystemen rückt in jüngster Zeit immer mehr in den Fokus des Interesses.

Standardmethoden der Kultivierung erfassten bis vor wenigen Jahren gerade einmal 0,1 % der mikrobiellen Arten in Böden, Gewässern und Därmen von Mensch und Tier (Fuhrmann 2009). Die modernen Hochdurchsatz-Sequenzierungstechnologien eröffnen nun einen viel umfassenderen Einblick in die höchst dynamische und vielfältige Welt der mikrobiellen Ökosysteme.

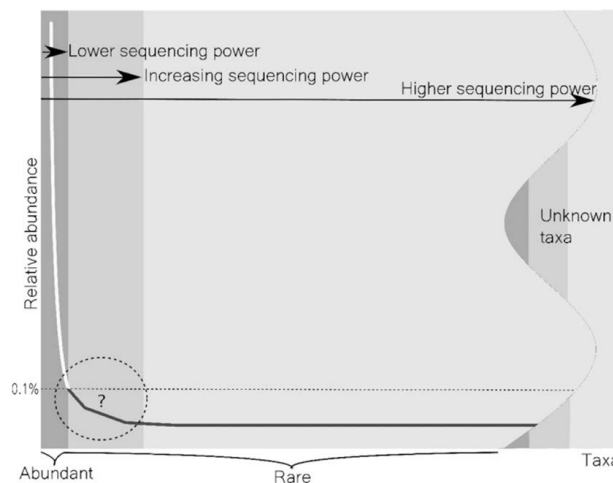


Abb. 1: Darstellung der mikrobiellen Artenhäufigkeits-Verteilung. Alle Taxa sind von der am häufigsten vorkommenden zur am wenigsten vorkommenden geordnet. Der lange Schwanz der Kurve veranschaulicht die seltene Biosphäre, aber der Anfang dieses langen Schwanzes ist nicht eindeutig, wie durch das Fragezeichen dargestellt. (Die Definition der «Seltenheit» bewegt sich heute von 0,01 % bis 0,1 % Anteil an der Gesamtpopulation. Anm. T.H.) Die Pfeile und Grüntöne veranschaulichen, wie unterschiedliche Auflösungen der Sequenzierungsstärke die Sicht auf die seltene Biosphäre beeinflussen, und die Wellen am Ende stellen die Taxa dar, die unbekannt sind (Abb. aus Pascoal 2021).

Die Anzahl der nachweisbaren Taxa stieg dadurch beispielsweise in der nordatlantischen Tiefsee von 500 auf über 5200 an (*Sogin 2006*). In den Darm-Mikrobiomen der Menschen in den Industrieländern wird die Zahl der verschiedenen Spezies mittlerweile auf etwa 2000 geschätzt – bei Naturvölkern ist sie deutlich höher. Die höchste Mikrobe-Diversität findet sich in gesunden Böden mit bis zu 10'000 Arten in einem Gramm Humus. Aber trotz modernster Techniken lässt sich die gesamte vorhandene Vielfalt nicht vollständig erfassen, es bleibt eine unbekannte Zone innerhalb der rare biosphere.

Das Verständnis der mikrobiellen Netzwerk-Funktionen wird durch die Unschärfe des Art-Begriffs bei den Prokaryonten weiter erschwert; durch ständigen Genaustausch (horizontaler Gen-Transfer), hohe Mutationsraten und ein dadurch enorm beschleunigtes Evolutionstempo – wir sprechen auch von Habitat-spezifischer Mikroevolution – sowie durch die noch weitestgehend unverstandenen Wechselwirkungen mit Myriaden von verschiedenen kommensalen Viren unterliegen die einzelnen Mikroben-Spezies einem ständigen Wandel, der in der Regel vom systemischen Kontext (Ökosystem oder Wirtsorganismus) und weniger von intrinsischen, genetischen Determinanten induziert ist. Das Mengenverhältnis von Viren und Bakterien innerhalb der Mikrobe-Sphären kann man grob mit etwa 10:1 angeben, wobei immer deutlicher wird, dass die Vielfalt, Variabilität und genetische Plastizität der Virosphäre unsere bisherigen, mehr von stabilen, taxonomischen Einheiten ausgehenden Vorstellungen bei weitem übersteigen (*Hardtmuth 2023*). Die modernen Sequenzierungstechniken haben zu einem exponentiellen Anstieg der neu entdeckten Viren-Spezies geführt, Schätzungen gehen heute von bis zu 10 Billionen verschiedenen Arten aus (*Adiliaghdam 2020*). Ihre Bedeutung als essentielle Systemkomponenten des Mikrobioms beginnen wir erst in Ansätzen zu verstehen. Die Viren stellen sich immer mehr als Urform alles Genetischen, ja als «Supermacht des Lebens» (*Mölling 2015*) heraus.

Die Bedeutung der seltenen Arten wird bislang weit unterschätzt. In der Regel werden sie bei den Mikrobiom-Analysen als funktionell nicht relevant vernachlässigt, was auch rein pragmatische Gründe haben kann, denn die Auflistung von 2000 verschiedenen Spezies eines menschlichen Darm-Mikrobioms hat keinerlei praktische Relevanz. Wir sprechen heute eher vom Metabolom als vom Mikrobiom, denn es kommt weniger auf die Einzelkomponenten als vielmehr auf die Funktion des Ganzen an. Das bloße Vorhandensein von Genen sagt noch nichts über deren Aktivität aus. Aber dennoch: Das routinemässige Entfernen der seltenen Arten aus den wissenschaftlichen Datensätzen hat dazu geführt, dass ein ganz wesentlicher Teil der Mikro-Biosphäre systematisch übersehen wird.

Man kann es als einen allgemeinen biologischen Trend bezeichnen, dass die Artenvielfalt der Lebewesen mit ihrer Kleinheit zunimmt – ein Prinzip, das in der Mikrowelt der Viren kulminiert. Die spezifischen Mikrobiome innerhalb eines Habitats zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht eine ho-

mogene Verteilung der Spezies, sondern wenige Arten in hoher Anzahl und sehr viele seltene Arten mit jeweils geringer Anzahl aufweisen. Die Differenzierung nimmt also im Einzelnen zu, die Masse wird einheitlicher.

Die seltenen Arten stellen einen Genpool dar, der eine nahezu unerschöpfliche Quelle genetischer Innovation bereithält (Fuhrmann 2009, Sogin 2006). Die seltene Biosphäre wird auch als Samenbank bezeichnet, die als Ressource für neue genetische Rekombinanten dient, die auch schnell zur dominierenden Mehrheit werden können. Ein Prokaryont mit Generationszeiten von 30 Minuten kann sich innerhalb eines Tages auf über 100 Billionen vermehren. So kommt das Erdöl abbauende Bakterium *Alkanivorax borkumensis* in sauberem Meerwasser kaum vor, kann aber innerhalb kurzer Zeit in ölverschmutzten Lebensräumen bis zu 90 % der gesamten Bakterienpopulation ausmachen.

Darüber hinaus deuten neuere Erkenntnisse darauf hin, dass seltene Arten reichlich vorhandene oder wachsende Prokaryoten durch horizontalen Gentransfer mit neuen Funktionen ausstatten können (Wang 2017) und so ganz neue Entwicklungslinien impulsieren.

Aber welche Bedeutung haben nun diese Minderheiten? Um das zu verstehen, brauchen wir im Grunde einen erweiterten Organismus-Begriff, eine Art System-Physiologie. Wie es in unserem Organismus seltene, kaum nachweisbare Zelltypen und Substrate in extrem niedrigen Konzentrationen gibt (manche Hormone und Zytokine haben Normwerte von wenigen Billionstel Gramm pro Milliliter), die aber dennoch unverzichtbar für das Ganze sind, so stellen seltene Arten «*Schlüsselspezies dar, die das Funktionieren von wirtsassoziierten, terrestrischen und aquatischen Umgebungen regulieren*» (Jousset 2017). Bakteriengesellschaften sind arbeitsteilig organisiert, d.h. einzelne seltene Spezies liefern exklusiv essentielle Vitamine, Aminosäuren, Gene, Enzyme u.v.m., die andere Arten nicht synthetisieren können, und ohne die bestimmte Systemleistungen nicht möglich wären. Der Abbau von anthropogenen Schadstoffen beispielsweise umfasst oft komplexe Stoffwechselwege, die nur gemeinsam von verschiedenen Arten geleistet werden können. Werden die seltenen Arten aus einem natürlichen Habitat entfernt, reduziert sich der Abbau von Schadstoffen und Toxinen abrupt (Delgado-Baquerizo 2016).

Seltene Arten halten ein Stoffwechsel-Repertoire bereit, auch wenn dieses im aktuellen Kontext nicht gebraucht wird. Im arktischen Meeresboden wurden thermophile Bakterien nachgewiesen, die dort in inaktivem Zustand überdauern und erst bei entsprechenden Bedingungen aktiviert werden. Dormanz wird der Zustand genannt, in dem Mikroorganismen ihr Wachstum und ihre Aktivität vollständig einstellen. Viele Bakterien bilden als Sporen stoffwechselreduzierte Formen, die oft riesige Zeiträume überdauern, wenn die Umweltbedingungen für das Überleben zu trocken, zu kalt, zu heiss oder zu salzig sind. In diesem Zustand sind sie extrem stresstolerant und bewahren damit die Stoffwechsel-Potentiale auch unter extremen Umweltbedingungen.

Seltene Arten sind quasi das «Salz der Diversität», das in allen Ökosystemen die Grundlage für Gesundheit, Resilienz, Flexibilität und Innovation bildet. Das menschliche Darm-Mikrobiom in seiner hoch individuellen Struktur gilt als eines der komplexesten, mikrobiellen Ökosysteme überhaupt und auch hier sind es die seltenen Arten, die immer mehr als wesentliche Quellen der Gesundheit erkannt werden (Bhute 2017). Vor allem die mit dem Alter zunehmende Einzigartigkeit der mikrobiellen Komposition bei jedem Individuum ist mit der Gesundheit, v.a. im höheren Lebensalter korreliert (Wilmanski 2021). Problematisch muss erscheinen, dass es innerhalb der rare biosphere besonders vulnerable Spezies gibt, die v.a. durch Antibiotika, Pestizide und immer mehr auch durch klimatische Stressoren dezimiert werden, so dass dadurch die Multifunktionalität und damit auch die Lebendigkeit schwinden. Bedenken müssen wir hierbei auch die Darm-Gehirn-Achse; unser ganzes Erleben, unsere Stimmungen, Gefühle und Gedanken werden von den qualitativen Einflüssen des Darmmikrobioms und seinen unzähligen Metaboliten, für die es interessanterweise entsprechende Rezeptoren im Gehirn gibt, beeinflusst.

«Die evolutionäre Erklärung für diese regulatorische Kontrolle der kognitiven Funktion ihres Wirts durch Mikroben ist rätselhaft. Die Billionen von Mikroben im Darm regulieren bzw. setzen ein riesiges Repertoire an Molekülen frei, die mit funktionell verschiedenen Klassen von Rezeptoren des Wirts interagieren können.»

(Agirman 2022, Übersetzung T.H.)

Es gilt also die kreative Potentialität ins Auge zu fassen, wie sie sich in diesen Urformen des Lebens, die die Mikrobiome letztlich repräsentieren, erhalten hat. Mikrobiomen wohnt immer die funktionelle Pluripotenz inne, wie wir sie von Stamm- und Meristemzellen, aber auch von unserem Denkkorgan kennen. Auf der genetischen Beschreibungsebene begegnet uns die umweltoffene Pluripotenz in der Vielfalt und kontext-korrelierten Dynamik des «genetic engineering» (Shapiro 1992), durch das gerade die Mikroorganismen ihre Evolution besonders anschaulich vorantreiben.

Wir können die Phänomene aber auch in ihren rein lebendig-qualitativen Aspekten beschreiben. Das momentan aktualisierte alte Sprichwort «everything is everywhere but the environment selects» von Baas Becking (Baas Becking 1934, Troussellier 2017) liesse sich auch so formulieren: Das Leben ist überall, aber es tritt nur da in die Erscheinung, wo es entsprechende Bedingungen vorfindet. Für die gegenwärtig immer drängender werdende Frage «Was ist Leben?» reicht eine rein biologische Beschreibung, die heute meist in «Begriffen des Leblosen» (Jonas 1994) gefordert wird, nicht aus. Im Lebendigen sind die Dinge eben nicht getrennt wie in der physischen Welt, alles ist gleichzeitig gegenwärtig, alles mit allem vernetzt. Die Mikroorganismen zeigen uns das Prinzip Leben als reine, zusammenhangschaffende, flüssige Potentialität.

Eine aktuelle Studie über «Basale Kognition» fasst unsere Erkenntnisse über Intelligenzleistungen bei Mikroben und niederen Organismen zusammen (Lyon 2021). Elementare Fähigkeiten wie Orientierungsreaktion, Empfindung/Wahrnehmung, Unterscheidung, Gedächtnis, Valenz, Entscheidungsfindung, Verhalten, Problemlösung, Fehlererkennung, Motivation, Lernen, Antizipation und Kommunikation lassen sich bei Mikroorganismen beobachten. Sie sind offensichtlich auch ohne neuronale Strukturen, möglich, die bisher als biologische Grundlage kognitiver Leistungen galten. Offenbar sind in den Urformen des Lebens schon Intelligenzleistungen veranlagt, von denen wir früher dachten, man bräuchte ein Gehirn dazu. Intelligenz ist augenscheinlich keine Eigenschaft des Nervengewebes, sondern ein allen Lebenserscheinungen innewohnendes Universalprinzip. Die rare biosphere und ihre «intelligente» Potentialität sind Ausdruck des Gesetzes, dass sich im Lebendigen das Ganze im Kleinsten im Sinne einer fraktalen Weltordnung spiegelt.

«Willst du dich am Ganzen erquicken, so musst du das Ganze im Kleinsten erblicken.»

(Goethe 1827)

Ein geisteswissenschaftlicher Blick auf die Mikroorganismen kann uns hier eine zwar vereinfachende, aber dennoch äusserst hilfreiche Verständnis-Brücke bauen. Man kann sich ja fragen, wie denn die ersten Zellen entstanden sind. Wie wir es auch drehen und wenden; der Moment, in dem sich eine kugelige Membran ausbildete, die ein innen und ein aussen scheidet, kann nicht als Entwicklungsprozess mit verschiedenen Zwischenstufen gedacht werden, ein Nach-und-Nach oder ein zunächst halbes Bläschen ist hier nicht denkbar, sondern der entscheidende Moment ist die Inversion des Äusseren zu einem Innenraum, wie er die gesamte Evolution bis hin zur menschlichen Selbst- und Weltreflexion durchzieht.

Spiegelt man an einer Kreislinie das aussen nach innen, so hat jeder Punkt ausserhalb der Kreislinie seine mathematisch-geometrische Entsprechung im Inneren. Je weiter wir aussen ins Grosse der Peripherie gehen, umso mehr entschwindet uns die Entsprechung zum Mittelpunkt hin im Inneren. Letztlich wäre, auf die lebendige Zelle übertragen, der gesamte Kosmos mit all seinen Gesetzmässigkeiten im Mittelpunkt als Potentialität veranlagt, die «unknown Taxa» (s. Abb. 1) entsprächen dem Grenzbereich der Nachweisbarkeit nahe dem Mittelpunkt. Dass es im Kleinen und Kleinsten immer differenzierter wird, ist für unsere gewohnte, mit molekularen Bausteinen operierende Vorstellung schwer zu fassen, aber das Rätsel des Lebens als reine «Tätigkeit» fordert eben solche grundsätzlichen, nicht bio-mechanistisch vorgeprägten Denkbewegungen. Die im Kleinsten verborgene Fülle der rare biosphere, ihre umkreisoffene Gestaltungs-Potentialität bzw. Multifunktionalität lebt offenbar von dieser Gesetzmässigkeit.

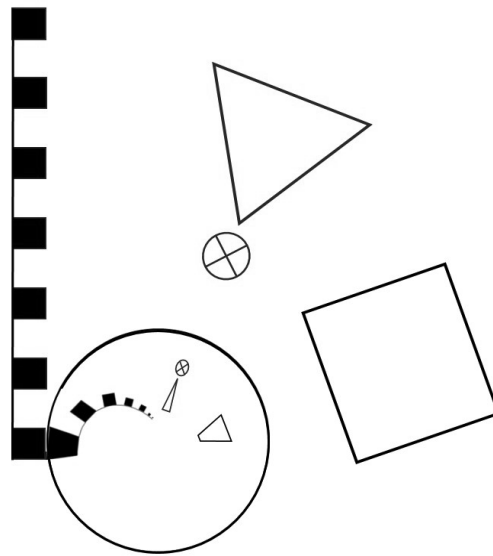


Abb. 2: Inversion. Innen-Aussen-Spiegelung am Kreis (T.H.)

Um sich diesem Zusammenhang aber exakter anzunähern, bedarf es einer Erweiterung des Inversions-Begriffs zu dem der «Polarität» im Sinne der polaren, nicht euklidischen Geometrie. Die mathematisch-geometrische Gesetzmässigkeit, mit der wir eine Kugel umstülpen, sodass die unendliche Peripherie zum Mittelpunkt wird, ist nur die reine, abstrakte Idealform eines Prozesses, der in der Natur in vielfältiger Weise lebendig variiert wird. Vom Samen über die Blätter bis zur Blüte und wieder zum Samen vollzieht die Pflanze eine Umstülpung, die wir in umgekehrter Richtung beim Menschen vom Gehirnschädel über die sich nach unten blattartig zum vegetativen Pol öffnenden Rippen wiederfinden. Unser Mikrobiom als eine Art Essenz aus der pluripotente Urbiosphäre und letztlich die Samenbildung offenbaren im unteren Menschen dieselbe Potentialität des Lebendigen, die wir in unserem Gedankenraum oben zur Verfügung haben. Das «Leben» im unteren Menschen wird zum Er-leben im oberen Menschen, beides ist funktionell über eine lemniskatische Umstülpungs-Struktur verbunden. Die «Tätigkeit» der Hormone im Stoffwechselbereich beispielsweise wird zu einer Erlebnisqualität im Seelenraum umgestülpt, die nun nicht mehr punktuell als stoffliches Substrat, sondern von der «Peripherie» her auf das Ich als Zentrum wirkt.

«Wir müssen uns gewöhnen an dieses Umstülpen. Wenn wir uns nicht daran gewöhnen, so bekommen wir nie eine richtige Vorstellung von dem, wie sich eigentlich die hiesige physische Welt zu der geistigen Welt verhält.»

(Steiner 1922, GA 214)

Wir könnten hier getrost statt von der geistigen auch von der lebendigen Welt sprechen. Der Umstülpungsgedanke ist für das Verständnis nicht nur des zellulären Lebens, auch für die Darm-Gehirn-Achse und damit für das gesamte Leib-Seele-Problem grundlegend (Hardtmuth 2023). Die nicht physisch-räumliche Dimension unserer inneren Bilder und Vorstellungen entspricht dem sog. ätherischen Gegenraum (Adams 1964), in dem alles mit allem lebendig verbunden ist.

«[...] der Ätherleib wird erlebt als ein Zusammenfluss der allumfassenden Gesetzmässigkeit des Makrokosmos. [...] der Ätherleib ist nichts anderes als ein zusammengedrücktes, die Weltgesetzlichkeit in sich spiegelndes Bild der kosmischen Gesetzmässigkeit.»

(Steiner 1904–1918, GA 35)

Die rare biosphere markiert einen wichtigen Orientierungspunkt auf dem Weg zum Verständnis der rein lebendigen (ätherischen) Welt. Je tiefer wir eindringen in die Mikrosphäre, umso weniger bekommen wir die Substrate in ihrer zunehmenden Diversität und Stoffwechseldynamik zu fassen, das letztlich Fest-stellbare – im wahrsten Sinn des Worts – bleibt nur noch der reine Prozess.

Literatur

- Adams, G. (1964): Von dem Ätherischen Raume. Stuttgart.
- Adiliaghdam, F., Jeffrey, K.L. (2020): Illuminating the human virome in health and disease. *Genome Medicine* 12(6).
- Agirman, G., Hsiao, E.Y. (2022): Gut microbes shape athletic motivation. *Nature* 612, S. 634.
- Baas Beeking, L.G. (1934): Geobiologie of Inleiding tot de Milieukunde. Den Haag.
- Bhute, S., Ghaskadbi, S., Shouche, Y.S. (2017): Rare Biosphere in Human Gut: A Less Explored Component of Human Gut Microbiota and Its Association with Human Health. In: Kalia, V., Shouche, Y., Purohit, H.: Mining of Microbial Wealth and MetaGenomics. Singapore, S. 133–142.
- Delgado-Baquerizo, M., Giaramida, L., Reich, P.B. et al. (2016): Lack of functional redundancy in the relationship between microbial diversity and ecosystem functioning. *J Ecol* 104, S. 936–946.
- Fuhrman, J. (2009): Microbial community structure and its functional implications. *Nature* 459, S. 193–199.
- Goethe, J.W. (1827): Gedichte. Ausgabe letzter Hand. Gott, Gemüt und Welt.
- Hardtmuth, T. (2023): Mikrobiom und Mensch. Die Bedeutung der Mikroorganismen und Viren in Medizin, Evolution und Ökologie. 2. Auflage. Berlin.

- Jonas, H. (1994): Das Prinzip Leben. Frankfurt, S. 28–29.
- Jousset, A., Bienhold, C., Chatzinotas, A. *et al.* (2017): Where less may be more: how the rare rabiosphere pulls ecosystems strings. Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology (ISME) 11, S. 853–862.
- Lyon, P., Keijzer, F., Arendt, D. *et al.* (2021): Reframing cognition: getting down to biological basics. Philosophical Transactions. Royal Society B 376/20190750.
- Mölling, K. (2015): Supermacht des Lebens – Reisen in die erstaunliche Welt der Viren. München.
- Pascoal, F., Costa, R., Magalhães, C. (2021): The microbial rare biosphere: current concepts, methods and ecological principles. FEMS Microbiology Ecology 97(1), fiae227.
- Shapiro, J.A. (1992): Natural genetic engineering in evolution. *Genetica* 86(1–3), S. 99–111.
- Sogin, M.L., Morrison, H.G., Huber, J.A. *et al.* (2006): Microbial diversity in the deep sea and the underexplored “rare biosphere”. *Proc Natl Acad Sci USA* 103(32), S. 12115–20.
- Steiner, R. (1922): Das Geheimnis der Trinität, GA 214, Dornach 1999, S. 157.
- Steiner, R. (1904–1918): Philosophie und Anthroposophie. GA 35. Dornach 1984, S. 126–127.
- Steiner, R. (1920): Geisteswissenschaft und Medizin. GA 312. Dornach 1999, S. 109.
- Troussellier, M., Escalas, A., Bouvier, T., Mouillot, D. (2017): Sustaining Rare Marine Microorganisms: Macroorganisms As Repositories and Dispersal Agents of Microbial Diversity. *Front Microbiol.* 8(947). DOI: 10.3389/fmicb.2017.00947. PMID: 28611749; PMCID: PMC5447324.
- Wang, Y., Hatt, J.K., Tsementzi, D. *et al.* (2017): Quantifying the importance of the rare biosphere for microbial community response to organic pollutants in a freshwater ecosystem. *Appl Environ Microbiol.* 83/e03321–16.
- Wilmanski, T., Diener, C., Rappaport, N. *et al.* (2021): Gut microbiome pattern reflects healthy ageing and predicts survival in humans. *Nature Metabolism* 3(2), S. 274–286.

Thomas Hardtmuth
Hirschhaldeweg 17
DE – 89555 Steinheim
drthomashardtmuth@posteo.de