EDITORIAL

Die dringende Notwendigkeit für mikrobielle Bildung in unserer Gesellschaft*

Kenneth Timmis,[1]* Ricardo Cavicchioli,[2] José Luis Garcia,[3] Balbina Nogales,[4] Max Chavarría,[5] Lisa Stein,[6] Terry J. McGenity,[7] Nicole Webster,[8] Brajesh K. Singh,[9] Jo Handelsman,[10] Victor de Lorenzo,[11] Carla Pruzzo,[12] James Timmis,[13] Juan Luis Ramos Martín,[14] Willy Verstraete,[15] Mike Jetten,[16] Antoine Danchin,[17] Wei Huang,[18] Jack Gilbert,[19] Rup Lal,[20] Helena Santos,[21] Sang Yup Lee,[22] Angela Sessitsch,[23] Paola Bonfante,[24] Lone Gram,[25] Raymond T. P. Lin,[26] Eliora Ron,[27] Z. Ceren Karahan,[28] Jan Roelof van der Meer,[29] Seza Artunkal,[30] Dieter Jahn[1] and Lucy Harper[31]

[1]Institute of Microbiology, Technical University Braunschweig, Germany.
[2]School of Biotechnology and Biomolecular Sciences, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
[3]Department of Environmental Biology, Centro de Investigaciones Biológicas (CIB) (CSIC), Madrid, Spain.
[4]Grupo deMicrobiologia, Dept. Biologia, Universitat de les
Illes Balears, and InstitutoMediterráneo de Estudios Avanzados 8IMEDEA, UIB-CSIC), Palma deMallorca, Spain.
[5]Escuela de Química, Centro de Investigaciones en Productos Naturales (CIPRONA), Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica & Centro Nacional de Innovaciones Biotecnológicas (CENIBiot), CeNATCONARE, San José, Costa Rica.
[6]Department of Biological Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada.
[7]School of Biological Sciences, University of Essex, Colchester, UK.
[8]Australian Institute of Marine Science, Townsville and Australian Centre for Ecogenomics, University of Queensland, Brisbane, Queensland, Australia.
[9]Hawkesbury Institute for the Environment, University of Western Sydney, Penrith, Australia.
[10]Wisconsin Institute for Discovery, University of Wisconsin-Madison, WI, USA.
[11]Systems Biology Program, Centro Nacional de Biotecnologia, CSIC, Madrid, Spain.
[12]Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV), Università degli Studi di Genova, Italy.
[13]Athena Institute, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands.
[14]Estación Experimental del Zaidín-CSIC, Granada, Spain.
[15]Center for Microbial Ecology and Technology (CMET), Ghent University, Belgium.
[16]Department of Microbiology, Radboud University Nijmegen, The Netherlands.
[17]Institut Cochin INSERM U1016, CNRS UMR8104, Université Paris Descartes, Paris, France.
[18]Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford, UK.
[19]Dept. of Pediatrics, University of California at San Diego,
San Diego, CA, USA.
[20]Department of Zoology, Molecular Biology Laboratory, University of Delhi, Delhi, India.
[21]Instituto de Tecnologia Química e Biológica, Universidade Nova de Lisboa, Oeiras, Portugal.
[22]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea.
[23]Bioresources Unit, AIT Austrian Institute of Technology, Tulln, Austria.
[24]Department of Life Science and Systems Biology, University of Torino, Italy.
[25]Department of Biotechnology and Biomedicine, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark.
[26]Department of Microbiology and Immunology, National University of Singapore, Singapore.
[27]School of Molecular Cell Biology & Biotechnology, Tel Aviv University, Israel.
[28]Department of Medical Microbiology, Ankara University, Turkey.
[29]Institut de Microbiologie Fondamentale, University of Lausanne, Switzerland.
[30]Department of Clinical Microbiology, Haydarpas¸a Numune Training Hospital, lstanbul, Turkey.
[31]Society for Applied Microbiology, London, UK.

Received 10 August, 2018; revised 24 March, 2019; accepted 24
March, 2019. *For correspondence. E-mail: kntimmis@gmail.com
The copyright line for this article was changed on 16 April 2019 after original online publication

* Übersetzt ins Deutsche von **Christina Nitzsche**, *Institut für Mikrobiologie, TU Braunschweig, Spielmannstr. 7, 38106 Braunschweig, Deutschland*

© 2019 The Authors. Environmental Microbiology published by Society for Applied Microbiology and John Wiley & Sons Ltd. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Zusammenfassung

Mikroben und ihre Aktivitäten haben allgegenwärtige, auffallend tiefgreifende und allgemein positive Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit und damit auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen, der gesamten biologischen Welt und sogar der gesamten Oberfläche des Planeten und seiner Atmosphäre. Gemeinsam und in erheblichem Maße in Partnerschaft mit der Sonne bilden die Mikroben das lebenserhaltende System der Biosphäre. Dies erfordert ihre gebührende Berücksichtigung bei Entscheidungen, die von Einzelpersonen und Familien im täglichen Leben sowie von Einzelpersonen und verantwortlichen Stellen auf allen Ebenen und in allen Phasen der gemeinschaftlichen, nationalen und planetarischen Gesundheitsbewertung, Planung und der Formulierung einschlägiger Strategien getroffen werden. Im Gegensatz zu anderen Themen, die sich auf die Menschheit auswirken, wie z.B. Finanzangelegenheiten, Gesundheit und Transport, über die ein weit verbreitetes Verständnis besteht, fehlt es jedoch in der allgemeinen Bevölkerung und in den Teilbereichen, die die Entscheidungsträger bilden, an Wissen über relevante mikrobielle Aktivitäten, wie sie sich auf unser Leben auswirken und wie sie zum Nutzen der Menschheit genutzt werden können - an *mikrobiologischer Kompetenz*. Entscheidungen, die Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität haben, sind oft undurchsichtig, und die verfügbaren Informationen sind manchmal verzerrt und in der Regel unvollständig, was zu erheblicher Unsicherheit führt. Infolgedessen führen selbst evidenzbasierte "beste" Entscheidungen nicht selten zu unvorhergesehenen, unbeabsichtigten und manchmal unerwünschten Ergebnissen. Wir sind daher der Meinung, dass *mikrobiologische Kompetenz* in der Gesellschaft für fundierte persönliche Entscheidungen sowie für die Politikentwicklung in Regierung und Wirtschaft und für den sachkundigen Beitrag der gesellschaftlichen Interessengruppen zu solchen politischen Entscheidungen unerlässlich ist. Ein Verständnis der wichtigsten mikrobiellen Aktivitäten ist für den Übergang von der Kindheit zum Erwachsenenalter ebenso wichtig wie einige der derzeit in der Schule unterrichteten Fächer und muss daher während der allgemeinen Bildung erworben werden. *Mikrobiologische Kompetenz muss Teil der Grundausbildung eines Weltbürgers werden.* Um die Erlangung *mikrobiologischer Kompetenz* in der Gesellschaft durch ihre Aufnahme in die Lehrpläne zu erleichtern, schlagen wir hier ein grundlegendes Unterrichtskonzept und -format vor, das sich an alle Altersgruppen, von der Vorschule bis zur Hochschule, anpassen lässt und die mikrobiellen Schlüsselaktivitäten in den Kontext stellt, wie sie unser tägliches Leben, die relevanten großen Herausforderungen, vor denen die Menschheit und der Planet Erde stehen, sowie die Ziele der Nachhaltigkeit und der nachhaltigen Entwicklung beeinflussen. Wir fordern Mikrobiologen, mikrobiologische Lehrgesellschaften und Fachleute der Mikrobiologie auf, sich an dieser Initiative zu beteiligen und zu ihr beizutragen, indem sie helfen, das Grundkonzept weiterzuentwickeln, Mittel zur Entwicklung kinderfreundlicher, ansprechender Lehrmittel und -materialien zu entwickeln und zu suchen, ihre Wirkung zu verstärken und, was am wichtigsten ist, Pädagogen, politische Entscheidungsträger, Wirtschaftsführer und einschlägige Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen davon zu überzeugen, diese Initiative zu unterstützen und zu fördern. *Mikrobiologische Kompetenz* in der Gesellschaft muss Realität werden.

Der Kontext

Mikrobiome und Biome

Gemeinschaften von *Mikro*organismen bilden eine zweite Haut auf praktisch allen Körperoberflächen, die mit der Umwelt aller *Makro*organismen der Biosphäre - den Tieren und Pflanzen - in Kontakt stehen. Diese mikrobiellen Häute stellen zusätzliche, dynamische, ökophysiologische Barrieren dar, die die physikalischen und chemischen Barrierefunktionen (z.B. gegen den Angriff von Krankheitserregern)

der Epitheloberflächen verstärken. Zusätzlich zu ihren Barrierefunktionen stehen solche Mikrobengemeinschaften in vielfältigen Wechselwirkungen mit ihren Wirten, stellen wesentliche Funktionen bereit und haben einen bedeutsamen Einfluss auf das Wohlbefinden und die biologischen Eigenschaften der Wirtspartner. Beispielsweise vermitteln pflanzenassoziierte Mikroben den Erwerb von essentiellen Mineralien einschließlich Stickstoff für das Wachstum (ohne die mikrobiell vermittelte Stickstofffixierung hätte die Biomasseproduktion der pflanzlichen Primärproduzenten für die Vermehrung und Evolution der tierischen Konsumenten nicht ausgereicht), schützen vor Infektionen und produzieren hormonähnliche Verbindungen, die das Pflanzenwachstum fördern. Einige Mikroben, die von Pflanzen getragen werden, sind für Tiere giftig und fungieren daher als pflanzliche Abwehr gegen Raubtiere. *Mikro*organismen schützen Tiere vor Krankheiten, vergären Nahrung im Inneren von Wiederkäuern wie Kühen und verdauen Nahrung für Insekten. Obwohl im Wesentlichen alle *Makro*organismen von oberflächlichen Mikrobengemeinschaften bedeckt sind, enthalten einige auch so genannte endosymbiotische *Mikro*organismen, die *innerhalb* von Wirtszellen leben. Endosymbionten spielen eine wichtige Rolle im Lebenszyklus verschiedener Organismen, wie Insekten (wo sie sogar das Geschlecht des Wirts bestimmen können), Schwämme und Pflanzen und einige andere *Mikro*organismen, wie z.B. Einzeller. Die intrazellulären Organellen, die in photosynthetischen Organismen für die Gewinnung von Sonnenenergie (Plastiden) und in den meisten Organismen für die Energiegewinnung (Mitochondrien) verantwortlich sind, haben sich aus endosymbiotischen Bakterien entwickelt. Die mikrobielle Komponente eines Organismus, das so genannte *Mikrobiom* [Mikrobiom: 'eine charakteristische Mikrobengemeinschaft, die einen definierten Lebensraum mit ausgeprägten physio-chemischen Eigenschaften besetzt. Der Begriff bezieht sich also nicht nur auf die beteiligten Mikroorganismen, sondern umfasst auch deren Wirkungsraum" (Whipps *et al*., 1988)], ist ein wesentliches Merkmal der Identität und Ökophysiologie eines Organismus: Mikroben-freie Versuchstiere und -pflanzen sind “Laborfreaks” mit fehlerhaften Entwicklungsprogrammen, die sie untauglich und unfähig machen, in ihren natürlichen Lebensräumen zu überleben. Das integrierte Ganze, bestehend aus *Mikrobiom* und Wirt, wird als *Biom* bezeichnet. Eine Störung des *Mikrobioms*, die zur so genannten *Dysbiose* führt, kann seine Beziehung zum Wirt stören und Funktionen stören, die zum Wohlbefinden beitragen, wie die durch das Herbizid Glyphosat hervorgerufene Störung der mikrobiellen Gemeinschaft des Bienendarms zeigt, was zu einer erhöhten Anfälligkeit für Pathogene führt (Motta *et al.*, 2018).

Der Mensch ist zu 50% mikrobiell

Das menschliche *Biom* ist, gemessen an der Zellzahl, zu 50% mikrobiell (Sender *et al.*, 2016). Die menschlichen Darmmikroben verdauen einen Großteil unserer zugeführten Nahrung und setzen die Nährstoffe in einer solchen Form frei, daß wir sie assimilieren und verwerten können, liefern essentielle Vitamine, Aminosäuren und andere Mikronährstoffe, die wir nicht selbst herstellen können, produzieren hormonähnliche Verbindungen und fungieren dadurch als zweites endokrines System (Brown und Hazen, 2015) und spielen derzeit eine Rolle bei einer Reihe von körperlichen und geistigen Krankheiten (Wang *et al.*, 2017; Du Toit, 2019). Ein klassisches Beispiel für die Mikrobiom-*Dysbiose* des Menschen ist die durch Antibiotika verursachte Störung der mikrobiellen Gemeinschaft im Darm, die dazu führt, dass *Clostridium difficile* die Oberhand gewinnt und eine pseudomembranöse Kolitis verursacht (Bartlett, 1979). Es ist entscheidend, dass wir erkennen, dass wir von der Geburt bis zum Tod in einer engen, dynamischen und für beide Seiten vorteilhaften Beziehung mit unseren mikrobiellen Partnern leben, einer integrierten, gegenseitigen Beziehung, die in erheblichem Maße festlegt, was und wie - und damit wer - wir sind (und natürlich auch, wer sie sind). Um Descartes Ausspruch auf den neuesten Stand zu bringen: *Ich denke, also sind wir.*

Wir mögen uns darüber ärgern, wie wenig wir unsere menschlichen Bekanntschaften kennen und ihnen vertrauen können, während wir im Grunde nichts über unsere intimsten und einflussreichsten Freunde wissen. Um unser persönliches Wohlergehen zu maximieren, müssen wir lernen, dass dies voraussetzt, dass wir verstehen

- *was unsere mikrobiellen Partner tun,*
- *welche Auswirkungen ihre Aktivitäten auf uns haben,*
- *wie unsere mikrobiellen Partner und ihre Aktivitäten durch unser Handeln beeinflusst werden, und*
- *wie wir unsere Partnerschaften zum gegenseitigen Nutzen verbessern können.*

Mikroben im Dienste der Menschheit

Mikroben beeinflussen uns nicht nur persönlich als Individuen, sondern werden seit jeher im Dienste der Menschheit genutzt, zunächst bei der Herstellung von fermentierten Lebensmitteln und Getränken (Bier, Wein, fermentierte Milchprodukte), gesäuertem Brot, Bindemitteln (Pflanzenfasern, wie Hanf, Flachs und Jute), der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Verwendung von Hülsenfrüchten, die stickstofffixierende Bakterien enthalten, Düngung mit mikrobieller Biomasse) und in der Folge bei der Reduzierung der Verschmutzung durch Abbau von Haushalts- und Industrieabfällen und der Bereitstellung von sauberem Trinkwasser. Insbesondere die Fermentierung von Nahrungsmitteln zur Konservierung und Verbesserung ihrer Nährstoffqualität und später die Verbesserung der Hygiene durch die mikrobielle Behandlung menschlicher Abfälle und die damit einhergehende Verringerung ihrer Erregerbelastung trugen wesentlich zum Aufstieg der Zivilisation und zur Qualität und Verlängerung des menschlichen Lebens bei.

In jüngerer Zeit haben die Mikroben im Mittelpunkt der aufkeimenden Bioökonomie gestanden (siehe z.B. Timmis *et al*., 2017a). Zeitgleich hat sich der globale wirtschaftliche Rahmen, der als 4. industrielle Revolution (4IR) bezeichnet wird, stark verändert. Neben unbegrenzter Konnektivität, künstlicher Intelligenz, massiver Sensorik, großer Datenverarbeitung, Robotik und vielen anderen Merkmalen sieht die 4IR auch die nachhaltige Produktion von Gütern im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft vor, in der es keinen Abfall und keine schädlichen Emissionen gibt und in der alles recycelt wird (z.B. siehe Nielsen, 2017). Mikrobiell vermittelte Prozesse sind für die 4IR ideal geeignet, da sie keine extremen Bedingungen, keinen hohen Energieaufwand und keine toxischen Prüfmittel erfordern. Die neu entstandenen Materialien und Abfälle sowie die beteiligten Reaktionsprodukte lassen sich im Allgemeinen leicht wiederverwerten. Infolgedessen haben sich die durch mikrobielle Biokatalyse vermittelten chemischen Umwandlungen, die früher eine eher marginale Ergänzung zu chemischen Prozessen darstellten und sich auf die Herstellung einer kleinen Anzahl von bioaktiven Molekülen mit hoher Wertschöpfung konzentrierten, als eine echte und ökologisch nachhaltige Alternative zur chemischen Umwandlung erneuerbarer Ausgangsstoffe in Produkte in großem Maßstab herausgestellt. Im Mittelpunkt dieser Entwicklungen stehen Zellfabriken (meist mikrobielle) und daraus gewonnene Enzyme, entweder natürlich oder umprogrammiert.

Eine indikative Auswahl aus der großen Bandbreite der aktuellen mikrobiellen Prozesse, zusätzlich zur Biokatalyse, umfasst

- die Herstellung von verschiedenen Lebensmitteln (Joghurt, Käse, Natto, Einzeleiweiß, Schokolade, gereifte Wurst, Essiggurken, Probiotika), Lebensmittelaromen (Vanille, Sojasauce, Kimchi, Paa Deak, Soumbala) und Nahrungsergänzungsmitteln (Vitamine, Aminosäuren, Folat, Probiotika),
- die Herstellung von Pharmazeutika (Antibiotika, Hormone, Biologika), Impfstoffen, Diagnose- und Biosensor-Überwachungssystemen und Körperpflegeprodukten,
- Schutz und Förderung des Wachstums von Nutzpflanzen,
- Fermentationen für die Herstellung verschiedener Chemikalien und Biomaterialien (Biokunststoffe, mikrobielle Cellulose),
- grüne Chemietechnik, wie die Elektrosynthese, und die Verwendung des Treibhausgases Kohlendioxid als Material für die chemische Synthese,
- Energieerzeugung (Biogas, mikrobielle Brennstoffzellen),
- Rückgewinnung von natürlichen Ressourcen (z.B. Metalle, durch industrielle mikrobielle Erzlaugung, die stark umweltbelastende thermische Prozesse ersetzt),
- die Behandlung von Abfallströmen und die biologische Sanierung von verschmutzten Standorten,
- Bio-Reinigung - Biorestaurierung und Bio-Konservierung von Objekten des historischen Kulturerbes (Denkmäler, Statuen, Fresken, Gemälde, Dokumente).

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl neuer Anwendungen, die sich in der Entwicklung befinden, darunter mikrobielle Therapien für Krankheiten, die durch Mikrobiota-*Dysbiose* verursacht werden (pseudomembranöse Kolitis, entzündliche Darmerkrankungen, Fettleibigkeit, Diabetes und verschiedene psychologische Erkrankungen; z.B. Rossen *et al.*, 2015), die synthetische Biologie-Reprogrammierung biotechnologisch relevanter Zellen und Organismen, um ein hohes Niveau an Produktion/Aktivität zu erreichen, Biotechnik auf Ökosystem-Ebene und so weiter. Die erstaunliche metabolische Vielseitigkeit der Mikroben bietet ständig neue Möglichkeiten für die nachhaltige Produktion von Massen- und Spezialchemikalien und -materialien (Lee *et al.*, 2019).

Die Fähigkeit, neue Möglichkeiten mikrobieller Aktivitäten rechtzeitig zu erkennen, die Vorteile und möglichen Risiken genau abzuschätzen und evidenzbasierte Entscheidungen über Maßnahmen zu treffen, die für ihre Nutzung erforderlich sind, ist für wissensbasierte, biozentrische Wirtschaftssysteme von wesentlicher Bedeutung, um wettbewerbsfähig zu sein und sich deutlich in Richtung nachhaltiger Praktiken zu entwickeln. Sie erfordert unbedingt angemessene Kenntnisse der zugrunde liegenden Mikrobiologie auf allen Ebenen der Entscheidungskette, einschließlich der Öffentlichkeit als Hauptakteure.

Politische Entscheidungen, die auf der Kenntnis der zugrunde liegenden mikrobiologischen Prozesse basieren, werden die Grundlage für zukünftigen Fortschritt, Wohlbefinden, das Erreichen von Nachhaltigkeit und den Fortschritt der Zivilisation sein. Die Schnelligkeit und Richtung unseres zukünftigen Fortschritts hängt stark ab vom Grad unseres Engagements für

- *das agnostische Erforschen mikrobiologischer Prozesse und dadurch unsere Fähigkeit zur Vorhersage und Identifizierung potenzieller neuer mikrobieller Anwendungen auf kommerzieller Basis kontinuierlich weiterzuentwickeln*[1]
- *neue Anwendungen zur Verbesserung der menschlichen und planetarischen Gesundheit angemessen zu nutzen,*
- *zeitgemäße Anwendungen zu erweitern und zu verbessern, und*
- *geeignete evidenzbasierte Entscheidungs- und Ressourcenzuweisungssysteme zu entwerfen, die Anreize für einschlägige Forschungs-, Entwicklungs- und Kommerzialisierungsaktivitäten geben und diese erleichtern und die Präferenzen der Beteiligten angemessen berücksichtigen.*

---

[1] Neue Entdeckungen sind das Ergebnis der Forschung. Die Forschung ist jedoch in Disziplinen und Gruppen verwandter Disziplinen organisiert, die in gewissem Maße als Hindernis für Entdeckungen transdisziplinärer Art wirken. Wichtig ist, dass viele der für den Umweltschutz, die menschliche Gesundheit und die Ernährungssicherheit erforderlichen Veränderungen eine transdisziplinäre Forschungsplanung und -durchführung erfordern. Da die Mikrobiologie in ihrer Natur und ihren Anwendungen so breit gefächert und in ihren Auswirkungen auf das Leben und den Planeten so allgegenwärtig ist, würde eine mikrobiologische Bildung die Forscher von Natur aus interdisziplinärer machen. Dies würde zweifellos die Entwicklung innovativer Lösungen und Managementoptionen für viele der kritischen Umwelt-/Gesundheitsprobleme, mit denen wir derzeit konfrontiert sind, beschleunigen.

Mikroben beeinflussen uns persönlich und kollektiv in hohem Maße

Mikroben können unser Leben auf so viele Arten beeinflussen und sind daher für viele persönliche Entscheidungen, die wir treffen, relevant, wie z.B. ob wir mit Kaiserschnitt (aseptisch) oder auf natürliche Weise gebären (Besiedlung des Neugeborenen durch mütterliche Mikroben; Wampach *et al,* 2018), das Stillen [Abgabe von schützenden Antikörpern gegen Krankheitserreger an das Baby, menschliche Milch-Oligosaccharide, die Bifidobakterien begünstigen, von denen angenommen wird, dass sie eine gesunde Entwicklung des Immunsystems fördern (Gomez de Agüero *et al*., 2016; Moossavi *et al.*, 2018), mütterliche Mikroben, die in der Muttermilch vorhanden sind, usw. (Milani *et al.*, 2017)], häufiges Verwenden starker Desinfektionsmittel zur Reinigung der Wohnung (Verringerung der Exposition von Säuglingen gegenüber der Mikrobiom-Diversifizierung und ihrer gesundheitlichen Vorteile: Finlay und Arrieta, 2016; Gilbert und Yee, 2016; Bach, 2018; Sharma und Gilbert, 2018; oder auch Krankenhäuser: siehe Caselli, 2017), sich gegen eine Infektion impfen oder behandeln lassen (Lane *et al*., 2018), Verwenden phosphorhaltiger Haushaltsreinigungsmittel (Richards *et al*, 2015; kann zur Eutrophierung und schädlichen Algenblüte in lokalen Gewässern beitragen), Verwendung keimtötender Seifen (kann eine Dysbiose der Hautmikrobiota verursachen; Gilbert und Yee, 2016), Erwerb eines Haustieres (erleichtert den Austausch von Mikrobiota, Trinh *et al*, 2018; erhöht den Phosphoreintrag in das Wassereinzugsgebiet, Hobbie *et al*., 2017) oder welche Nahrungsmittel zu verzehren sind (z.B. Rindfleisch, das einen erheblichen Methan-Fußabdruck hat; Rindfleisch und Milchprodukte, deren Verzehr mit Krebserkrankungen korreliert, zur Hausen et al., 2017; anderes Fleisch und Gemüse: Herkunft, Haltbarkeit, Assoziationen mit bekannten Risikofaktoren usw.) und wie es gelagert und zubereitet wird, wie viel gelüftet/befeuchtet/entfeuchtet werden muss und so weiter.

Dies kann durch die Betrachtung nur einer Aktivität veranschaulicht werden, die wir mit beträchtlichem Vergnügen ausüben - Urlaub und Freizeit - und die uns verschiedenen Infektionen und mikrobiell verursachten Krankheiten aussetzen kann, die zum Teil lebensbedrohlich sind und in unserer häuslichen Umgebung nicht oder weniger häufig vorkommen, durch

- *Baden*, in Süß- und Meerwasser (z.B. *Cryptosporidium, Vibrio vulnificus, Leptospira*, etc.) und in nicht ausreichend gechlorten Becken und insbesondere in Whirlpools (*Mycobacterium, Pseudomonas, Legionellen, Candida, Trichophyton, Giardia*, etc.),
- *Essen,* ungekochter oder kontaminierter Lebensmittel, insbesondere Meeresfrüchte (z.B. *Salmonella, Vibrio, EHEC, Campylobacter, Listeria, Norovirus*, Hepatitis-Viren und verschiedene Parasiten), und sogar angemessen gekochte Lebensmittel, die hitzestabile Toxine enthalten (einschließlich des tödlichen Red Tide Neurotoxins und verschiedener Mykotoxine),
- *Trinken*, kontaminierte Flüssigkeiten (z. B. Wasser, Fruchtsäfte usw.),
- *Sexuelle Aktivitäten*, mit neuen Partnern (klassische Geschlechtskrankheiten, aber auch HIV usw.),
- *Auswahl des Urlaubsortes*, an dem Infektionserreger wie Gelbfieber, Malaria, Zika-Virus, Hepatitis-Virus, Dengue-Virus, Borreliose und Tuberkulose endemisch sein können und
- *Auswahl von Unterkunfts- und Wellness-Einrichtungen*, einschließlich Kreuzfahrtschiffen (z.B. *Cyclospora, Norovirus, Legionella* und Mykobakterien).

Natürlich können Geschäftsreisen uns ähnlichen Gefahren aussetzen, und der Medizintourismus kann zusätzliche, mit Operationen und Krankenhäusern verbundene Risiken mit sich bringen.

Mikrobielle Aktivitäten beeinflussen gleichermaßen kollektive Unternehmungen, und ihre Berücksichtigung ist für viele strategische/politische Entscheidungen von wesentlicher Bedeutung, wie z.B. die Einführung eines neuen Ausgangsmaterials bzw. die Erzeugung eines neuen Abfalls in einer industriellen Produktionsanlage, die Einführung eines neuen Bestandteils in einem Lebensmittelprodukt, die Einrichtung einer neuen Lebensmittelversorgungskette, die Einführung einer neuen Maßnahme im Bereich der öffentlichen Gesundheit, die Umsetzung neuer landwirtschaftlicher Praktiken oder die Einführung neuer Maßnahmen zum Schutz unserer marinen Systeme vor dem Verfall.

Wenn wir - sei es auf persönlicher oder politischer Ebene - wirksame Entscheidungen treffen wollen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu vorhersehbaren und beabsichtigten Ergebnissen führen, müssen wir wissen, welche mikrobiellen Aktivitäten relevant sind und wie diese Aktivitäten sich auf die Umsetzung auswirken und von ihr beeinflusst werden könnten. Routinemäßige Entscheidungen in unserem Leben müssen von einem grundlegenden Verständnis folgender Aspekte geprägt sein

- *welche nachteiligen Folgen sich aus unseren Handlungen ergeben können und*
- *wie wir unser Verhalten ändern können, um solche Folgen für uns und andere zu vermeiden oder zu mildern.*

Mikroben beeinflussen die gesamte Biosphäre durchdringend und tiefgreifend

Mikroben waren die ersten Lebensformen, die vor fast vier Milliarden Jahren entstanden sind, und sind gleichzeitig die Zukunft: Sie werden den Planeten Erde noch lange nach dem Verschwinden des Menschen und anderer Lebensformen bewohnen. Die unsichtbare Welt der Mikroben stellt eine

weitaus größere evolutionäre und metabolische Vielfalt dar als die uns bekannten sichtbaren Organismen. Was die Biomasse betrifft, so sind 90% des Lebens in den Ozeanen mikrobiell. Photosynthetische Algen und Cyanobakterien bilden einen Hauptbestandteil des marinen Planktons und sind die Grundlage der ozeanischen Nahrungsnetze. *Prochlorococcus* und *Synechococcus* entziehen der Luft jährlich etwa 10 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, was etwa zwei Drittel der gesamten Kohlenstoffbindung in den Ozeanen entspricht. Mikroben regulieren globale und lokale biogeochemische Prozesse, die die Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre, als auch den Klimawandel grundlegend beeinflussen und die Gesundheit von Menschen, Tieren, Pflanzen, Böden und die Wasserversorgung regulieren. Sie erzeugen 50% des Sauerstoffs, den wir atmen. Frühe Mikroben produzierten den Sauerstoff, der allen sauerstoffverbrauchenden Organismen die Entwicklung ermöglichte, sowie die Ozonschicht, die es dem Leben ermöglichte, von den tiefen Ozeanen an Land zu gelangen. Sie sind die wichtigsten Abfallverwerter und Regeneratoren des Planeten. Mikroben sind allgegenwärtig, und ihre Aktivitäten erhalten und beeinflussen die Qualität allen Lebens auf dem Planeten. *Sie sind das lebenserhaltende System der Biosphäre.* Obwohl wir Menschen uns als Verwalter der planetarischen Gesundheit betrachten, sind Mikroben viel mächtiger in der Beeinflussung, Regulierung und Veränderung der planetarischen Aktivitäten. *Im Extremfall:* Wenn eine Gruppe von Mikroben, die einen kritischen Prozess des Nährstoffkreislaufs durchführt, aus der Biosphäre verloren ginge und nicht durch eine andere, funktionell gleichwertige Gruppe ersetzt werden könnte, würde das Leben auf der Erde, wie wir es kennen, aufhören zu existieren.[2] Das globale Umweltmikrobiom ist hinsichtlich der Aktivitäten und der Dimension der einzige Verbündete, auf den wir zählen können, wenn es darum geht, die Auswirkungen von Schadstoffemissionen umzukehren, die aus industriellen Aktivitäten, intensiver Landwirtschaft und menschlicher Überbevölkerung resultieren (de Lorenzo *et al*., 2016)

---

[2]Obwohl dieser Gedanke (insbesondere in Kombination mit der anderen Aussage unten, *dass alle Mikroben überall sind*) auf den ersten Blick eher weit hergeholt erscheinen mag, lohnt es sich, über Folgendes nachzudenken: Veränderungen der Umwelt- und Lebensbedingungen, z.B. durch die globale Erwärmung, können für ihre Bewohner ungünstig sein. Die Folgen sind, dass die Bewohner (1) in günstigere Lebensräume abwandern müssen, (2) neue Eigenschaften entwickeln müssen, die besser auf die neuen Bedingungen abgestimmt sind, oder (3) sterben und, wenn sie geographisch begrenzt sind, vielleicht aussterben. Die Evolution wird am leichtesten durch sich schnell fortpflanzende Organismen beeinflusst. Aber Mikroben in einer Reihe von Lebensräumen der Biosphäre vermehren sich extrem langsam. Wenn Veränderungen schnell eintreten, ist es denkbar, dass sie aussterben können. Gehören sie zu einer Gruppe, die eine kritische Funktion der Biosphäre vermittelt, könnte dies schwerwiegende Folgen haben. Curtis (2006) hat dies recht pointiert ausgedrückt: "... wenn der letzte Blauwal am letzten Panda ersticken würde, wäre das katastrophal, aber nicht das Ende der Welt. Aber wenn wir versehentlich die letzten beiden Arten von Ammonium oxidierenden Bakterien vergiften würden, wäre das eine andere Sache. Es könnte jetzt passieren und wir würden es nicht einmal wissen..."

Es ist von wesentlicher Bedeutung, dass wir gemeinsam die zentrale Rolle der Mikroben bei den planetarischen Prozessen und der Gesundheit anerkennen und uns Kenntnisse darüber aneignen, was Mikroben tun und tun können, damit wir wirksame Partnerschaften und Strategien für die gemeinsame Verantwortung für die Gesundheit unseres Planeten entwickeln können. Es ist unerlässlich,

- *das empfindliche Gleichgewicht zwischen den mikrobiologisch vermittelten Nährstoffkreisläufen, der planetarischen Funktion und der Gesundheit der Biosphäre zu verstehen und zu schätzen, und*
- *sicherzustellen, dass wir keine (auch unbeabsichtigten) negativen Auswirkungen auf mikrobielle Kohorten/Gemeinschaften haben, die eine entscheidende Rolle für das Funktionieren der Biosphäre spielen.*

Die Nutzung mikrobieller Aktivitäten ist entscheidend für die Lösung einiger großer Herausforderungen und das Erreichen der Ziele der nachhaltigen Entwicklung

Die Menschheit steht derzeit vor großen Herausforderungen, zu denen ein Ungleichgewicht beim Zugang zu Nahrung, sauberem Wasser, Gesundheitsfürsorge, Bildung, Energie und Rohstoffen, anhaltende Armut, der Verlust von besiedeltem Land aufgrund der globalen Erwärmung - verursacht durch den Anstieg des Meeresspiegels - und die Wüstenbildung gehören; dies sind einige der *Großen Herausforderungen*. Die Bedürfnisse der Menschheit und des Planeten Erde sowie ein Aktionsplan zur nachhaltigen Befriedigung dieser Bedürfnisse sind in den UN-Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs; United Nations (2015) Transforming our World) detailliert aufgeführt: Die Agenda für nachhaltige Entwicklung bis zum Jahr 2030. https://sustainabledevelopment.un.org/ post2015/ transformingourworld). Eine kürzlich erschienene Ausgabe von Microbial Biotechnology (2017) untersuchte das Spektrum der mikrobiellen Technologien, die einen Beitrag zur Erreichung der SDGs leisten/zeigen können, einschliesslich solcher, die Probleme der Nahrungsmittelversorgung einer ständig wachsenden Weltbevölkerung verbessern können (Garcia *et al*, 2017; Trivedi *et al*., 2017), der Produktion von Treibhausgasen, der globalen Erwärmung und einiger ihrer negativen Folgen, der globalen Umweltverschmutzung, und zur Maximierung der Nutzung erneuerbarer Energien und der Nachhaltigkeit des weltweiten Verbrauchs natürlicher Ressourcen usw. (z.B. de Lorenzo, 2017; Verstraete und de Vrieze, 2017). Diese Ausgabe befasste sich auch mit dem außergewöhnlichen Potenzial der mikrobiellen Biotechnologie für eine weitere SDG, nämlich *nachhaltiges Wirtschaftswachstum und die Schaffung von Arbeitsplätzen*, in Bezug auf neue Unternehmen, Beschäftigung und Wohlstand, zum Teil im Kontext der Bioökonomie (Timmis *et al*., 2017b), aber auch in anderen Zusammenhängen. Eine Reihe von Editorials in derselben Zeitschrift unter dem übergreifenden Titel *Das Mikrobiom als Quelle für neue Unternehmen und die Schaffung von Arbeitsplätzen* in den Jahren 2017 und 2018 untersuchte die Fähigkeit der Mikrobiomtechnologie, neue Unternehmen und Beschäftigungsmöglichkeiten zu schaffen.

Viele der Maßnahmen, die auf dem langen Weg zur Bewältigung der großen Herausforderungen und zur Erreichung der SDGs umgesetzt werden müssen, werden mikrobielle Prozesse beinhalten. Die wichtigsten politischen Entscheidungen, die erforderlich sind, um diese Maßnahmen in Gang zu setzen/zu erhalten/zu erhöhen, erfordern Kenntnisse über die relevanten mikrobiellen Aktivitäten und darüber, wie diese für eine maximale Wirkung kanalisiert werden können.

Entscheidungen, die auf der Kenntnis der zugrunde liegenden mikrobiologischen Prozesse basieren, könnten in einigen Fällen größere, in einigen Fällen globale Katastrophen verhindern

Mikroben sind zentrale Akteure und Schlüsselakteure der planetarischen und biologischen Evolution. Wenn die Beiträge der Mikroben zu den relevanten Prozessen nicht gebührend anerkannt, vermittelt und berücksichtigt werden und bei der Planung nicht zugrunde gelegt wird, welche Rolle die Mikroben bei einer beabsichtigten Veränderung spielen können, ist die Entwicklung und Umsetzung von politischen Maßnahmen auf allen Ebenen (international, national, regional und individuell) risikobehaftet, suboptimal oder unwirksam und im schlimmsten Fall kontraproduktiv. Es gibt einige Beispiele für potenziell vermeidbare Katastrophen, die durch die Entscheidungspolitik negativ beeinflusst/verursacht werden/keine Entscheidungen treffen:

Die Krise der Antibiotikaresistenz. Bereits in den 1960er/Anfang der 1970er Jahre warnten führende Mikrobiologen wie Falkow (Falkow *et al*., 1961; Falkow, 1970, 1975), Watanabe (Watanabe, 1963; Watanabe, 1966) und Levy (Levy *et al.*, 1976; Levy, 1982) vor der zunehmenden Entstehung und Verbreitung von Antibiotikaresistenzen aufgrund der übermäßigen Verschreibung und des nichtklinischen Einsatzes von Antibiotika (in der Tat hat Alexander Fleming, der Entdecker des Penicillins, bereits 1945 in seiner Nobelvorlesung vor der Gefahr gewarnt: https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf). Ähnliche Warnungen wurden seither wiederholt ausgegeben, einige davon bezogen sich auf den Einsatz von Antibiotika in der Aquakultur (z.B. Cabello, 2006), aber ohne großen Erfolg. Heute betrachten wir die Antibiotikaresistenz als eine der wichtigsten Herausforderungen in der Medizin, weil sie eine zunehmende Zahl von bisher behandelbaren lebensbedrohlichen Infektionen nicht mehr behandelbar macht. (http://www.wpro.who.int/entity/drug_resistance/resources/global_action_plan_eng.pdf). Das Risiko, das von Antibiotikaresistenzen im Jahr 2050 ausgeht, wird im internationalen Bericht *Tackling drug resistant infections globally: final report and recommendations* (https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf) auf kumulative Kosten von 100 Billionen Dollar und auf 10 Millionen ansonsten vermeidbare Todesfälle pro Jahr geschätzt (interessanterweise ist die erste von vier Empfehlungen die Notwendigkeit einer globalen öffentlichen Sensibilisierungskampagne, die sich insbesondere an Kinder und Jugendliche richtet. Seltsamerweise wurde die Kampagne zwar mit 40-100 Millionen Dollar pro Jahr veranschlagt, aber die empfohlene Kampagne umfasste keine Grundausbildung). Trotzdem wird der nichtklinische Einsatz von Antibiotika in der Tierhaltung und Aquakultur im Zeitraum 2010-2030 voraussichtlich um 67% zunehmen (https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_with%20cover.pdf).
Wenn Gesundheitsbehörden, Politiker und Wirtschaftsführer (und vor allem die Öffentlichkeit) sich der Fähigkeit von Mikroben bewusst gewesen wären, als Reaktion auf Veränderungen in ihrer Umwelt - in diesem Fall die massive, umweltbedingte Einführung starker antimikrobieller Verbindungen - rasch neue Funktionen zu entwickeln und zu verbreiten, und somit die Warnungen von Falkow *et al*. zu schätzen wüssten, könnten wir heute in einer ganz anderen Situation sein.

Die Rückkehr der praktisch ausgerotteten Kinderkrankheiten. Völlig vermeidbar war das Wiederauftreten von Masern, Keuchhusten und Diphtherie aufgrund einer geringeren Akzeptanz und Durchimpfung, was auf ein grundlegendes Unverständnis des impfstoffbezogenen Risikos, der zugrundeliegenden Mikrobiologie und der nicht evidenzbasierten persönlichen Entscheidungen - der zögerlichen Impfung - in Ländern zurückzuführen ist, die diese Krankheiten praktisch ausgerottet hatten (Lane *et al.*, 2018).

Der Anstieg von Allergien. Obwohl schwere Infektionen im Kindesalter ernsthaft bekämpft werden müssen, wird davon ausgegangen, dass mildere Infektionen und eine vernünftige Exposition gegenüber Mikroben aus der Umwelt die Entwicklung eines gesunden Immunsystems bei Säuglingen erleichtern (Bach, 2018). Der Anstieg der *Mikrobiophobie* (Keimphobie) und Werbekampagnen, die den Eindruck erwecken, dass alle Mikroben schlecht sind und eliminiert werden müssen, um eine sichere häusliche Umgebung zu schaffen, haben möglicherweise erheblich zur aktuellen Explosion der Immunfunktionsstörungen in unserer Gesellschaft beigetragen (z.B. Allergien, Asthma, Ekzeme und sogar neurologische Störungen). In der Tat wurde kürzlich gezeigt, dass die Schutzwirkung von Hautmikroben gegen Hautkrebs durch die Verwendung von aggressiven keimtötenden Seifen reduziert wird (Nakatsuji *et al.*, 2018). Solche Folgen hätten gemildert werden können, wenn geeignete Maßnahmen zur Aufklärung über die Notwendigkeit getroffen worden wären, ein Gleichgewicht

zwischen hygienischen Praktiken zur Verringerung der Krankheitserregerbelastung und Strategien zur Erhaltung einer gesunden Mikrobiota herzustellen, die uns durch mikrobielle Exposition von Böden, Tieren und Pflanzen wichtige ökophysiologische Dienste, einschließlich einer wirksamen Immunsystemerziehung, bietet (Finlay und Arrieta, 2016; Gilbert *et al.*, 2017).

Die Treibhausgaskrise. Mikroben produzieren und verbrauchen ebenso Treibhausgase; daher sind Anstrengungen zur Reduzierung der mikrobiellen Emissionen einerseits und zur Erhöhung des Verbrauchs andererseits von entscheidender Bedeutung. Wenn die mikrobielle Beteiligung an Themen betrachtet wird, ist es entscheidend, quantitative Aspekte und die Tatsache zu verstehen, dass die Prozesse möglicherweise nicht linear verlaufen. Die Fixierung des Treibhausgases CO_2 durch Mikroben und Pflanzen ist im Vergleich zu seiner Freisetzung aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe durch den Menschen langsam - der normale Kreislauf der Dinge ist aus dem Gleichgewicht geraten -, weshalb die CO_2-Konzentration rasch ansteigt: Unsere Pflanzen und mikrobiellen Freunde können mit den menschlichen Aktivitäten nicht mithalten. Die Treibhausgasemissionen führen zu einer globalen Erwärmung, die wiederum das Auftauen der Permafrostböden verursacht, was dann eine neue mikrobielle Produktion von Methan und CO_2 ermöglicht und damit die Folgen des Verbrauchs fossiler Brennstoffe verstärkt und verschlimmert.

Die Produktion von Tierfleisch, insbesondere von Wiederkäuern, geht mit erheblichen Emissionen des Treibhausgases Methan einher, eine Tatsache, die schon seit langem bekannt ist. Die Fleischproduktion selbst basiert auf der Futtermittelproduktion, die wiederum mit dem Einsatz von stickstoffhaltigen Düngemitteln verbunden ist. Harnstoff, der von den Bodenmikroben in Ammoniak und das Treibhausgas CO_2 aufgespalten wird, ist seit langem als stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft weit verbreitet (obwohl er derzeit ausläuft). Andere stickstoffhaltige Düngemittel führen zur mikrobiellen Produktion des extrem potenten Treibhausgases N_2O (und natürlich zur Eutrophierung: Abfluss nährstoffinduzierter schädlicher Algenblüten in angrenzenden Gewässern/Körpern, die Fischsterben, Hypoxie und Nutzungseinschränkungen der betroffenen Gewässer verursachen können). Es liegt auf der Hand, dass wichtige persönliche und politische Entscheidungen bezüglich der Mengen an Fleischproduktion und -konsum, die über die wesentlichen Ernährungsbedürfnisse hinausgehen, getroffen werden müssen/sollen.

Das Abfließen von Nährstoffen in die Küstengewässer führt zu einem raschen Sauerstoffverbrauch durch die ansässigen Mikrobiota, was wiederum zur raschen Ausdehnung der Sauerstoffminimumzonen beiträgt. Bei der Identifizierung von neun planetarischen Grenzen für eine nachhaltige Zukunft, darunter Klimawandel, Verlust der biologischen Vielfalt und Ozonabbau, wurde der Stickstoffkreislauf als die am stärksten gefährdete Grenze identifiziert, da die Anwendung von menschlich hergestelltem Dünger heute alle natürlichen Prozesse bei der Bereitstellung dieses lebenswichtigen Nährstoffs für die Biosphäre übersteigt (Rockström *et al*., 2009). In vielen Ländern wird derzeit eine Debatte über die Beschränkung des Einsatzes dieser Düngemittel geführt, aber die Notwendigkeit, die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren und Nahrungsmittel zu einem für die ärmeren Mitglieder der Gesellschaft erschwinglichen Preis zu produzieren, ganz abgesehen von den Geschäften der Landwirtschaft und ihren Lieferketten, sind verwirrende Faktoren. Es erscheint logisch, dass die Landwirte ermutigt werden sollten, bei der Entscheidungsfindung und der Formulierung einer vernünftigen Politik die Führung zu übernehmen, da sie mehr als alle anderen den Zusammenhang zwischen Boden-Stickstoff-Änderungen und Pflanzenproduktivität verstehen. Dennoch ist die mikrobielle Beteiligung an der Frage der Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit stickstoffhaltigen Düngemitteln nur selten ein wichtiges Element der persönlichen und politischen Debatte/Entscheidungsfindung, und genau dort muss sie stattfinden, um solche Diskussionen sinnvoll

und effektiv zu gestalten. Allgemeiner gesagt, befassen sich die jüngsten politischen Entscheidungen zur Begrenzung der Treibhausgasemissionen in erster Linie mit den anthropogenen Emissionen und ignorieren im Wesentlichen die Tatsache, dass Mikroben sowohl an der Produktion als auch am Verbrauch erheblicher Mengen von Treibhausgasen, einschließlich N_2O und CH_4, zusätzlich zu CO_2 maßgeblich beteiligt sind. In jedem Fall sind wir alle auf unterschiedliche Weise von der globalen Erwärmung betroffen und daher wichtige Akteure. So verändert sie beispielsweise die globale Verteilung von Krankheitserregern und deren Vektoren und führt dadurch zur Entstehung von Krankheiten bei neuen, immunologisch naiven Populationen von Menschen und Tieren und abwehrunfähigen Pflanzen, mit der Möglichkeit der epidemischen Ausbreitung.

Die Bodenkrise. Der Boden ist die unverzichtbare Haut der Erde. Er unterstützt das Pflanzenwachstum und beherbergt eine unglaubliche Vielfalt an Tieren und Mikroben, die eine erstaunliche Bandbreite biogeochemischer Prozesse vermitteln, die die Bodenfunktionen charakterisieren und seine Gesundheit bestimmen. Der Boden filtert Oberflächenwasser, das in Grundwasserleiter versickert, die Milliarden von Menschen mit Trinkwasser versorgen. Der Boden enthält wertvolle Nährstoffe und dreimal so viel Kohlenstoff wie in der Erdatmosphäre enthalten ist. Doch der Boden der Erde erodiert rasch und landet oft in Bächen, Flüssen und Ozeanen, wobei die Nährstoffe auf dem Weg dorthin freigesetzt werden. Die meisten Länder verlieren ihren Oberboden um ein Vielfaches schneller, als er durch bodenbildende Prozesse (Gesteinsverwitterung) erzeugt wird. Zunehmend extreme Wetterereignisse erhöhen die Erosionsrate. Bodenmikroorganismen produzieren Polysaccharide, die als Klebstoff wirken, um dem Boden Struktur und Stabilität zu verleihen und dadurch seine Widerstandsfähigkeit gegen Erosion zu erhöhen. Der katastrophale Bodenverlust auf einem Großteil der landwirtschaftlichen Nutzflächen der Erde, der voraussichtlich noch vor dem Ende des 21. Jahrhunderts eintreten wird, wird dazu führen, dass die für die Ernährung der Weltbevölkerung benötigten Nahrungsmittel nicht mehr produziert werden können, dass große Mengen an Nährstoffen freigesetzt werden, die unsere Wasserwege verschmutzen, und dass Kohlenstoff freigesetzt wird, der die globale Erwärmung verstärken wird. Wenn diese Krise abgewendet werden soll, ist es absolut unerlässlich, dass die politischen Entscheidungsträger wissensbasierte Strategien einführen, um mikrobielle Aktivitäten, die die Bodenstabilität verbessern, besser zu nutzen. Um dies zu gewährleisten, ist es ebenso wichtig, dass die Weltbürger als zentrale Akteure den Ernst des Problems und die verfügbaren mikrobiellen Optionen erkennen. Dafür ist jedoch der Erwerb *mikrobiologischer Kenntnisse* von wesentlicher Bedeutung.

Schadstoffanreicherung in der Umwelt und in den Nahrungsnetzen. Es reicht nicht aus, zu wissen, dass Mikroben an einem Umweltprozess beteiligt sind, es ist wichtig zu wissen, was sie gut und was sie weniger gut tun. In der Vergangenheit war es üblich, davon auszugehen, dass die bekannte metabolische Vielseitigkeit der Mikroben für alle umweltschädlichen Stoffe sorgt, die von der Industrie, den Haushalten, den Krankenhäusern usw. freigesetzt werden, ohne die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, dass es Einschränkungen gibt. Aber obwohl Mikroben eine erstaunliche Bandbreite organischer Materialien abbauen können, ist der Stoffwechsel einiger dieser Stoffe langsam, manchmal sehr langsam. Wenn also ihre Produktion und Freisetzung in die Umwelt schneller erfolgt als die Fähigkeit der Mikroben diese abzubauen, sammeln sich solche Materialien akkumulieren weiterhin an und verschmutzen die Umwelt, wie die Entdeckung langlebiger toxischer Chemikalien wie PCBs und Dioxine in der gegenwärtigen Nahrungsmittelkette Jahrzehnte nach dem Verbot ihrer Herstellung und der sich derzeit abspielenden Katastrophe der Verschmutzung durch petrochemisch hergestellte Kunststoffe zeigt.

Eine Reihe ernsthafter Probleme, die sich uns derzeit stellen, darunter die schleichende Ausbreitung von Resistenzen gegen Medikamente der letzten Instanz unter den Krankheitserregern, die Bodenerosion, das Problem der mit Plastik verschmutzten Ozeane und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit der Wildtiere sowie die Bildung und Anhäufung von Mikroplastiken im Nahrungsnetz, wären vorhersehbar und in erheblichem Maße vermeidbar gewesen, wenn

- *die politischen Entscheidungsträger in der Lage gewesen wären, die wahrscheinlichen Ergebnisse ihrer Entscheidungen über mikrobiologische Prozesse und die langfristigen Auswirkungen zu verstehen, und*
- *ein größeres Spektrum gesellschaftlicher Interessengruppen schon viel früher in die Lage versetzt worden wäre, die Risiken der heutigen Politik und des heutigen Verhaltens zu erkennen*

Das Exposom und das besondere Problem der chronischen Langzeit-Exposition gegenüber geringen Mengen biologisch aktiver Substanzen

Eine der großen Herausforderungen, die für das Thema Mikrobiologie-Kompetenz besonders relevant ist, ist die biologische und chemische Verschmutzung der Biosphäre, denn menschliche Entscheidungen sind sowohl das Problem - sie können zu politischen Maßnahmen führen, die zu einer Verschmutzung führen - als auch der Schlüssel zu ihrer Lösung - sie können zu politischen Maßnahmen führen, die die Verschmutzung verringern (*reduzieren, sanieren, recyceln*). Biologische Verschmutzung, insbesondere die Verschmutzung durch Fäkalien in großen Ballungsräumen, wird zwar in Ländern mit hohem Einkommen weitgehend kontrolliert, stellt aber gelegentlich aufgrund von technischen Ausfällen oder extremen Wetterereignissen ein Problem dar und kann in Ländern mit niedrigem Einkommen immer noch problematisch sein. Die industrielle Tierhaltung für die Fleischproduktion fügt jedoch eine weitere Dimension hinzu, indem sie in großem Maßstab tierische Abfälle erzeugt, die enorme Mengen an Fäkalien enthalten, die mit Antibiotika angereicherte und -resistente Mikroben, einschließlich Krankheitserreger, enthalten. Obwohl ein Teil dieser Abfälle in anaeroben Fermentern unschädlich gemacht wird, verbleibt ein Teil in der Umwelt, wo er eine Gefahr darstellen kann.

Obwohl die Toxizität und die Lebenszyklen neuer Chemikalien und Pharmazeutika in der Regel vor der Einführung in den Verkehr beurteilt werden, liefern solche Beurteilungen meist Informationen über die akute Toxizität, die über kurze Zeiträume nachweisbar ist, meist in Standardmodellen, die wenig mit den besonderen inhärenten Gefahren der Chemikalien zu tun haben. Die Bewertung der akuten Toxizität für die am unmittelbarsten betroffenen Organismen und der geringen chronischen Toxizität, die sich langfristig manifestiert, ist eine große Herausforderung. Viele biologisch aktive Chemikalien, insbesondere Arzneimittel in der Herstellung von Abfallströmen und Krankenhaus- und Haushaltsabwässern, sind in sehr niedrigen Konzentrationen aktiv, und einige von ihnen gelangen unverändert über Abfallbehandlungsanlagen in die Umwelt. Hinzu kommt die Tatsache, dass einige Chemikalien durch Umweltmikroben teilweise zu neuen Metaboliten abgebaut werden können, die nicht in Umweltverträglichkeitsprüfungen erfasst werden, die auf andere Weise toxisch sein können als die ursprünglichen Chemikalien und die sogar noch toxischer sein können als die Chemikalien, die ursprünglich in die Umwelt gelangt sind. Eine chronische Exposition gegenüber solchen Chemikalien und Metaboliten auf niedriger Ebene kann schleichende Folgen für die Bevölkerung haben. Zu den in der Umwelt weit verbreiteten Verbindungen gehören Xenoöstrogene - endokrine Disruptoren (Monneret, 2017) -, die zumindest teilweise für den Rückgang der Fruchtbarkeit von Menschen und anderen Tieren verantwortlich gemacht werden, sowie Insektizide, die für die abnehmende Anzahl von

Bestäubern wie Bienen verantwortlich sind (Godfray *et al*., 2015; Christen *et al*., 2018). Ein weiteres, noch schwierigeres Problem ist die Vermischung verschiedener umweltbelastender Chemikalien in der Umwelt, und die Auswirkungen von Chemikalienmischungen, insbesondere chronischer Exposition bei niedrigen Konzentrationen, auf die Gesundheit von Mensch und Umwelt sind im Wesentlichen unbekannt, aber zweifellos erheblich. Mikroben haben die Fähigkeit, viele solcher Verbindungen abzubauen, oder können sich weiterentwickeln, und werden oft die Hauptakteure bei der Entfernung aus der Umwelt sein. Allerdings sind sie möglicherweise nicht in der Lage, andere abzubauen, zumindest nicht mit sinnvollen Raten, insbesondere wenn sie in sehr niedrigen Konzentrationen vorhanden sind, und noch mehr, wenn sie in komplexen Gemischen vorliegen.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz der Komplexität der biologischen und chemischen Verschmutzung und der ebenso komplexen mikrobiellen Fähigkeit, Schadstoffe unschädlich zu machen, der einzige Weg zur Verringerung der bestehenden Verschmutzung darin besteht, unser Verständnis der relevanten mikrobiellen Prozesse zu verbessern und sie zu nutzen. Für neue Chemikalien, einschließlich derer, die mit Hilfe der synthetischen Mikrobiologie hergestellt werden, muss ein verantwortungsbewusstes Design definierte Endpunkte für ihre Lebenszyklen beinhalten. Aber, um es noch einmal zu wiederholen: Welche Beschränkungen die mikrobielle Welt auch immer haben mag, sie bleibt der einzige Wirkstoff, auf den wir uns verlassen können, um der außergewöhnlichen Verschmutzungsbelastung, die auf unserem Planeten lastet, entgegenzuwirken (de Lorenzo *et al.*, 2016).

Es ist von wesentlicher Bedeutung, dass die mikrobiellen Abbaufähigkeiten und -begrenzungen gewürdigt und verstanden werden und in den Mittelpunkt der Entwicklung von Kontroll- und Eindämmungsstrategien gestellt werden, die letztlich den Grad unserer Exposition gegenüber Umweltschadstoffen bestimmen werden. Eine konzertierte, kohärente und nachhaltige (globale) Politik ist erforderlich, um

- *die Identifizierung, Bewertung und Überwachung der Arten und Mengen bioaktiver Stoffe und deren Mischungen in unserer Umwelt auf lokaler, regionaler und globaler Ebene zu rationalisieren,*
- *unser Verständnis dafür zu verbessern, wie diese Substanzen auf die Gesundheit des Planeten, der Gemeinschaft und des Einzelnen wirken,*
- *die Bemühungen zu koordinieren, sie aus der Umwelt zu entfernen, ihre toxischen Auswirkungen zu mindern und ihren Eintrag in und ihre Migration durch das Nahrungsnetz zu reduzieren, und*
- *Maßnahmen zu entwickeln, um unsere Belastung durch solche Schadstoffe zu verringern.*

Globale Konnektivität und mikrobielle Reaktionen auf Veränderungen

Nicht zuletzt sind zwei wesentliche Merkmale unseres Planeten hervorzuheben. Das erste ist die Konnektivität: Die gesamte Planetenoberfläche und die Atmosphäre sind durch Wasser, Wind und mechanische Versorgungsketten menschlicher Produkte miteinander verbunden, die einen Großteil dessen, was sich auf der Oberfläche und in der Atmosphäre befindet, über Land-, See- und Lufttransportfahrzeuge bewegen, manchmal über Tausende von Kilometern. Eine weithin angenommene Folge dieser *physischen Verbindung* ist der Transport von Kunststoffabfällen in alle Teile der Ozeane, weit entfernt von den Orten, an denen sie entsorgt werden, und das Auffinden von

giftigen polychlorierten Biphenylen - PCB - in an den Polen lebenden Tieren, die extrem weit von ihren Produktions- und Verwendungsorten entfernt sind. Obwohl wir also glauben, dass die potenziellen Gefahren einer Chemikalie in ihrer Produktionsanlage sicher gehandhabt werden, können die Konnektivitäts- und Verteilungsmechanismen zu weit entfernten Problemen führen. Aber auch biologische Stoffe tragen zur Konnektivität und Bewegung in der Biosphäre bei, und zwar durch aktive und passive Bewegung, sei es durch Flug, im Falle von fliegenden Insekten, Vögeln und durch die Luft reisende Menschen, Schwimmen und Schweben im Falle von Wasserorganismen usw., sowie durch luft- und wassergetragene Samen, Pollen und Plankton. Die explosionsartige weltweite Ausbreitung des schweren akuten Atemwegssyndroms (SARS) im Jahr 2003, die jährliche Grippeepidemie mit Ursprung in Asien, ein Ausbruch enterohämorrhagischer *E. coli* in Deutschland, die durch aus Ägypten importierte Bockshornkleesamenkeime übertragen werden, die Ausbreitung von Krankheiten aufgrund der verstärkten Einwanderung, wie z.B. die zunehmende Tuberkulose in afrikanischen Ländern wie Marokko und durch Zecken übertragene afrikanische Viren in Spanien, sind Beispiele für die Folgen der *biologischen Konnektivität*. Auch der internationale Handel spielt eine bedeutende Rolle bei der Verbreitung von Krankheitserregern und kann für die derzeitige geografische Ausbreitung verschiedener Pflanzenkrankheiten verantwortlich sein, die durch *Xylella fastidiosa*, einen der weltweit schwerwiegendsten Pflanzenpathogene, verursacht werden und enorme wirtschaftliche Auswirkungen auf die Landwirtschaft, die öffentlichen Gärten und die Umwelt haben. Im Gegensatz zu vielen vektorübertragenen Krankheitserregern, die wirtsspezifische Vektoren und damit ein eingeschränktes Wirtsspektrum haben, wird *X. fastidiosa* durch eine Reihe von Pflanzensaft saugenden Insekten übertragen und infiziert dadurch ein breites Spektrum von Pflanzenwirten. Ballastwasser in Schiffen, das an verschiedenen Punkten der Erde aufgenommen und abgelassen wird, kann neue Populationen nicht einheimischer, manchmal gefährlicher Organismen, wie z.B. toxische Algenarten, schaffen, die Biosicherheitsprobleme darstellen. Und Wüstenstäube, die reich an Phosphor, Eisen und Mikroben sind, werden durch Luftströmungen an entfernte Orte transportiert: Staub aus der Sahara fällt regelmäßig in Europa und düngt das Wasser des Golfs von Mexiko und der Saragossasee, wodurch sich Algenblüten entwickeln können. So wie Wasser- und Luftverbindungen die Verteilung langlebiger Chemikalien, einschließlich radioaktiver Stoffe, in der Biosphäre und der Atmosphäre vermitteln, so sorgen sie für die Verbreitung winziger, fast schwereloser Mikroben. Aber: Im Gegensatz zu Chemikalien können sich Mikroben reproduzieren, opportunistisch besiedeln und jeden Ort beeinflussen, den sie für günstig halten. Die globale Verteilung von Mikroben lässt sich in einemMantra zusammenfassen: *alle Mikroben sind überall*. Eine logische Konsequenz, die vielleicht noch aussagekräftiger ist: *Wenn Mikroben in der Lage sind, von einem Prozess zu profitieren, indem sie irgendwo einen Prozess beeinflussen, werden sie dort sein und diese Fähigkeit ausüben.*
Ein zweites wichtiges Merkmal des Planeten ist die Tatsache, dass Veränderungen, die durch Naturereignisse oder zufällige oder absichtliche Handlungen von Menschen verursacht werden, oft eine Reaktion, manchmal eine unerwartete Reaktion, hervorrufen, die zu einer Folge führt, die sich von der erwarteten unterscheiden kann. Sie kann auf physikalisch-chemische oder häufig auch biologische, insbesondere mikrobiologische Reaktionen zurückzuführen sein. Wenn wir entscheiden, dass wir eine Aktion durchführen müssen, müssen wir daher zusätzlich zu den üblichen Überlegungen zur Durchführbarkeit, zu den Kosten, zur Logistik usw. berücksichtigen, dass Mikroben nicht passiv gegenüber signifikanten anthropogenen Veränderungen - absichtlich oder unabsichtlich - der Umwelt sind: Sie reagieren aktiv auf die Folgen unserer Handlungen und verändern sie dadurch positiv oder negativ. Wir müssen immer die Frage stellen: Sind mikrobielle Aktivitäten direkt oder indirekt in den diskutierten Prozess involviert oder von ihm betroffen, und wenn ja, wie sind ihre möglichen/wahrscheinlichen Reaktionen auf die vorgeschlagene Aktion? Leider haben wir noch nicht gelernt, wie man mit Mikroben “spricht”, und können sie daher nicht fragen, was sie tun werden, wenn wir Änderungen vornehmen. Daher sind evidenzbasierte Vorhersagen aus der Überwachung und

Modellierung, wie Mikroben auf Umweltveränderungen reagieren, und Vorsicht unerlässlich. Um das altbewährte Motto - *denke global, handle lokal* - wieder in den Vordergrund zu stellen, sollten wir die Menschen dazu auffordern*, lokal zu handeln, aber nur nach gebührender Berücksichtigung des Potenzials für lokale, regionale und globale Reaktionen, die zu kollateralen Konsequenzen führen können (einschließlich nicht-intuitiver Konsequenzen, die sich von dem betrachteten Thema völlig unterscheiden können).*

Die vernetzte Natur unseres Planeten erfordert, dass wir, bevor wir handeln, in der Lage sein müssen

- *die potenziellen Spillover-Effekte, den Grad der Auswirkungen und die entsprechenden Wege von lokalen Maßnahmen auf mikrobiologische Aktivitäten in Regionen unterschiedlicher Nähe und auf globaler Ebene sorgfältig zu bewerten,*
- *die Wirkungsszenarien, einschließlich der Wirkungsdauer und der Gegenmaßnahmen, mit geeigneten Methoden richtig zu kartieren und zu modellieren,*
- *sorgfältig alternative Vorgehensweisen in Betracht ziehen, wenn wir, basierend auf konservativen Annahmen, kein Vertrauen in unsere Vorhersagen haben, und*
- *die Politik zu überwachen, zu überprüfen und zu verbessern und die lokalen Einheiten zu befähigen, unkoordinierte oder unvorhersehbare Aktionen zu verhindern, die unbeabsichtigt oder anderweitig negative Auswirkungen haben könnten.*

Das Problem

Das Problem ist, dass das Wissen über Mikroben und ihre Aktivitäten derzeit in einer kleinen Gruppe von Spezialisten, den Mikrobiologen, konzentriert ist. Natürlich hat die Gesellschaft schon immer Spezialisten eingesetzt, um Entscheidungsträger zu beraten, z.B. Ökonomen, um Regierungen über die Kosten der Umsetzung neuer Politiken zu beraten. Das Problem dabei ist, dass mikrobielle Aktivitäten so allgegenwärtig sind und die alltäglichen Entscheidungen eines jeden in der Gesellschaft direkt und persönlich beeinflussen, dass die Option für eine rechtzeitige Konsultation von Mikrobiologen oder die Abfrage von mikrobiologischem Wissen trotz des Internetzugangs zu relevanten Informationen in den meisten Situationen unpraktisch oder unmöglich ist. So haben wir auf der einen Seite Mikrobiologen, die auf keiner Ebene einen geringen Einfluss auf politische Entscheidungen haben, und auf der anderen Seite politische Entscheidungsträger und Entscheidungsträger, denen das für fundierte Entscheidungen notwendige Schlüsselwissen fehlt. Wie werden wir die uns bevorstehenden Krisen wirksam angehen, wenn weder die zugrundeliegenden Ursachen der Krisen noch mögliche Lösungen (z.B. Brüssow, 2017) von den politischen Entscheidungsträgern und Interessengruppen verstanden und bewertet werden können?

Wenn wir vermeiden wollen, dass sich Fehler der Vergangenheit wiederholen, die zu katastrophalen Ergebnissen der oben beschriebenen Art geführt haben, müssen die wesentlichen Informationen, die die richtige Wahrnehmung der Probleme, angemessene Entscheidungen und optimale, evidenzbasierte politische Entscheidungen untermauern, ein integraler Bestandteil unserer individuellen und kollektiven Wissensbasis sein. Um zu vermeiden, dass in Zukunft vermeidbare katastrophale Ereignisse ausgelöst werden,

- *müssen Grundkenntnisse über mikrobiologische Prozesse und Aktivitäten sowie über deren multidirektionale Wechselwirkungen und Abhängigkeiten nicht nur Teil des öffentlichen Bewusstseins werden, sondern*
- *die Zwischenkenntnisse über diese Prozesse müssen Teil der einschlägigen Fähigkeiten der politischen Entscheidungsträger sein, und*
- *Entscheidungssysteme müssen in angemessener Weise evidenzbasierte Kriterien und eine Überprüfung durch Experten erfordern.*

Ein Weg zur Lösung: Erlangung von mikrobiologischer Kompetenz in der Gesellschaft

Schlüsselelemente der Mikrobiologie müssen Teil der Grundausbildung werden

Einige Mitglieder der Gesellschaft, wie Pädagogen, Politiker, führende Industrielle, Leiter nationaler und internationaler Behörden usw., haben den größten Bedarf an mikrobiologischem Wissen, weil ihre Entscheidungen größere gesellschaftliche Auswirkungen haben als die anderer. Dennoch treffen alle Individuen mikrobiell relevante Entscheidungen und entwickeln täglich mikrobiell relevante Praktiken. Darüber hinaus sind wir alle an wichtigen politischen Entscheidungen beteiligt, die unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden sowie die unseres Planeten betreffen. Um die Rechte unserer Bürgerinnen und Bürger wahrnehmen zu können und unserer Verantwortung zur kompetenten Information der Entscheidungsträger nachzukommen, sei es als Wählerinnen und Wähler oder als Mitglieder von Interessengruppen, müssen wir mikrobiologisch bewandert sein. Es besteht daher ein entscheidender Bedarf an *mikrobiologischer Kompetenz* auf allen Ebenen der Gesellschaft: *Mikrobiologische Kompetenz muss Teil der "Tätigkeitsbeschreibung" von Erwachsenen werden.*

Ein gemeinsamer Wissensspeicher und die Fähigkeit zur kritischen Beurteilung, die in der Kindheit erworben wurden, werden allgemein als wesentlich für den Übergang ins Erwachsenenalter angesehen. Bisher wurden die Kenntnisse der Muttersprache, einer Fremdsprache, der Geschichte, Geographie, des Zeitgeschehens, der Mathematik, Physik, Chemie und Biologie usw. als wesentliche Fächer einer ausgewogenen Bildung angesehen, d.h.: Die Kenntnis dieser Fächer wird als ein wesentliches Merkmal der Reifung angesehen, die für die damit verbundenen Verantwortlichkeiten in Familie und Beruf, für die Verpflichtung, neu ankommende Informationen für das persönliche und berufliche Leben zu verarbeiten, und für die Notwendigkeit, produktive tägliche Entscheidungen zu treffen, die uns durch die Wendungen des Lebens navigieren. Wie Bergey 1916 behaupten wir, dass das Wissen und Verständnis von Mikroben und ihren Aktivitäten für die Allgemeinbildung ebenso wichtig ist wie diese Themen.

Die Mikrobiologie muss zu einem Kernelement des Schullehrplans werden, damit die Entscheidungsträger angemessen informiert sind und alle anderen Beteiligten ein grundlegendes Verständnis dafür haben, wie die Gesellschaft und ihre Handlungen eng mit unserer mikrobiellen Welt verbunden sind und mit ihr in Beziehung stehen. Als Folge davon werden die gesellschaftlichen Interessenvertreter befähigt

- *fundierte Entscheidungen für sich selbst (und andere, z.B. Nachkommen) zu treffen,*
- *die Argumente für und gegen Entscheidungsalternativen kritisch zu bewerten und dadurch denjenigen, die in ihrem Namen Entscheidungen treffen, fundierte Präferenzen zu vermitteln, und*
- *in der Lage sein, diejenigen zur Rechenschaft zu ziehen, die keine Entscheidungen auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse treffen.*

Ein persönliches, erfahrungszentriertes Unterrichtskonzept und -format für alle Altersgruppen, mit Schwerpunkt auf den großen Herausforderungen und den Zielen der nachhaltigen Entwicklung

Da Mikroben unser Leben vom ersten Tag an beeinflussen (in der Tat beeinflussen sie uns viel früher), sollte der Unterricht bereits zu Beginn der Grundschulbildung beginnen und sich wie ein roter Faden durch alle Bildungsstufen ziehen, um Entscheidungsträger auf allen Ebenen zu befähigen, fundierte Entscheidungen über bewährte Verfahren zu treffen und Jung und Alt mit dem Wissen zu versorgen, die Grundlage solcher Entscheidungen zu verstehen. Die Menschen müssen den Unterschied zwischen dem, was ziemlich sicher, was wahrscheinlich und was unbekannt ist, begreifen. Der Einzelne muss in der Lage sein, evidenzbasierte Risiko-Nutzen-Bewertungen vorzunehmen, die es ihm ermöglichen, Entscheidungen über grundsätzlich nützliche Maßnahmen zu treffen, die ein gewisses Maß an Risiko bergen, oder konstruktiv mit den Stellen zu interagieren, die solche Entscheidungen in seinem Namen treffen. Und sie müssen wissen, welche neuen Erkenntnisse gewonnen werden müssen, um in Zukunft die beste evidenzbasierte Politik zu machen.

Wir stellen uns vor, dass Mikrobiologie-Lehrpläne für Kindergärten, Grundschulen, Sekundarschulen und Gymnasien entwickelt werden, zusätzlich zu den Lehrplänen für den Mikrobiologieunterricht für die Lehrerausbildung im Hochschulbereich (siehe auch z.B. Bergey, 1916; Savage und Bude, 2014; Scalas *et al*, 2017; http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html-society/environmental-health/microorganisms/; http://www.actionbioscience.org/biodiversity/wassenaar.html,https://enviroliteracy.org/environment-society/environmental-health/microorganisms/-planet-is-it-anyway-1.html). Sie sollten auch als öffentlicher Bildungsdienst zur Verfügung stehen, der mikrobiologisch gebildete Personen auf den neuesten Stand bringt und diejenigen, die in der Schule keinen Unterricht erhalten haben, in die Lage versetzt, die Grundlagen zu erlernen und neue Fortschritte aufzuholen. Obwohl die Entwicklung dieser Lehrpläne in die Zuständigkeit der betreffenden Lehrkörper fällt, schlagen wir zur Erleichterung ihrer Umsetzung eine Reihe von Themen vor - ein Rahmenwerk für die mikrobiologische Bildung (*Mikrobiologie-Ausbildung in Schule und Vorschule: ein Rahmenwerk, das sich auf die Erfahrungen des Kindes konzentriert*) - und ein Unterrichtsformat, das eine einfache Anfangsfrage zur Alltagserfahrung beinhaltet, gefolgt von der Exposition der zugrundeliegenden Mikrobiologie in einfacher Sprache, ihrer Bedeutung für die *Grand Challenges* und SDGs, ihrer Beziehung zu biogeosphärischen Prozessen und zur planetaren Gesundheit und, was wichtig ist, ihrer Konsequenz für die Entscheidungsfindung, z.B.

- Papa: Ich hätte heute Nachmittag wirklich gerne einen Hamburger auf der Bowlingbahn gegessen, aber Jenny hat mir gestern gesagt, dass Kühe zur globalen Erwärmung beitragen: Stimmt das? *(Treibhausgase, Quellen und Senken, Pansenverdauung, Methanemissionen, globale Erwärmung, steigender Meeresspiegel und Wetterextreme, wie wirken sie sich auf uns aus, SDG-13: Bekämpfung des Klimawandels)*;
- Mama: Uns wurde im Unterricht gesagt, dass Joanne an Masern erkrankt ist: Warum wurde sie nicht wie ich geimpft? *(Wirksamkeit des Impfstoffs, Risiken, Zusammenhänge und Kausalitäten, Risiko: Nutzenüberlegungen, Herdenimmunität, Kollateralnutzen der Immunisierung, SDG-13: Gesundes Leben sichern);*
- Mama: du sagst mir immer, ich solle mir nach dem Toilettengang die Hände waschen, weil "Kacka" eklig sei. Aber was passiert damit, nachdem es weggespült wurde? *(Abwasserbehandlung, fäkale Krankheitserreger, fäkale Indikatoren als Proxy für die Belastung mit fäkalen Krankheitserregern und die Wasserqualität, SDG-6: Hygiene für alle)*;
- Junge Frau: warum wachsen Pflanzen nicht im Dunkeln? *(Pflanzen und photosynthetische Mikroben fangen Sonnenenergie ein und produzieren Biomasse: die Basis des Nahrungsnetzes; Photosynthese, Chloroplasten, Mitochondrien, die von frühen Mikroben stammen; Pflanzen und photosynthetische Mikroben liefern Nahrung für die Welt, Energie, erneuerbare chemische Rohstoffe, umweltfreundliche, nachhaltige Entwicklung, SDG 2: Den Hunger beenden, 7: Zugang zu nachhaltiger Energie sicherstellen, 12: nachhaltige Produktionsmuster sicherstellen)*

Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die Relevanz/Bedeutung der zugrundeliegenden Mikrobiologie für die Gesellschaft für die Schülerinnen und Schüler zu Beginn des Unterrichts deutlich wird.

Die Ziele der Sammlung ausgewählter Themen sind

- *Hilfe bei der Entwicklung von geeigneten Lehrplänen für verschiedene Altersstufen in unterschiedlichen gesellschaftlichen und kulturellen Umfeldern,*
- *die wichtigsten planetarisch-biosphärisch-menschlichen Prozesse und Probleme aufdecken, die durch mikrobielle ökophysiologische Aktivitäten beeinflusst oder untermauert werden*
- *informieren, wie sich diese Aktivitäten auf unser Wohlbefinden und das anderer Mitglieder der Biosphäre auswirken,*
- *zeigen, wie mikrobielle Aktivitäten durch unser Handeln und die daraus resultierenden Konsequenzen beeinflusst werden,*
- *aufzeigen, wie wir mikrobielle Aktivitäten zum persönlichen, menschlichen und planetarischen Nutzen lenken oder ausnutzen und zur Erreichung der SDGs beitragen können.*
- *eine Perspektive unseres Platzes in der weiteren Welt bieten und zeigen, wie wir mikrobiell im globalen Dorf und mit dem Rest der Biosphäre verbunden sind.*

Der Wissensrahmen für die *mikrobiologische Bildung* wird zunächst aus etwa 100 erfahrungszentrierten Themen bestehen, die unter den Kategorien Menschliches Wohlergehen, Planet Erde, Wasser, Pflanzen, Tiere, Ernährung - Lebensmittel - Getränke und Biotechnologie zusammengefasst sind und bald *kostenlos* online verfügbar sein werden. Diese Themen werden sicherlich im Laufe der Zeit verbessert und verfeinert werden.

Es muss betont werden, dass trotz der mangelnden Sichtbarkeit der diskutierten Themen - Mikroben - der Unterricht über mikrobiologische Themen für Kinder besonders faszinierend sein kann, da

Mikrobiologie ein praktisches Versuchsfach ist und die Schülerinnen und Schüler auf verschiedenen Schulstufen erstaunliche Experimente durchführen können. Vorschläge für einfache Experimente, die für jede Themenkategorie relevant sind, werden auch online zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus gibt es viele interessante mikrobielle Prozesse, die von kommerziellen Unternehmen (Brauerei, Käseherstellung, Brotherstellung, Fermentationen usw.) und öffentlichen Einrichtungen (Abfallbehandlungsanlagen, diagnostische Labors usw.) durchgeführt werden und die, je nach den örtlichen Gegebenheiten, durch Schulausflüge hautnah erlebt werden können. Auch hier wird eine illustrative Liste von möglichen Exkursionen mit organisatorischen Vorschlägen für Lehrer, wie die Erfahrung für maximalen Wissensgewinn, Interesse und Freude der Schülerinnen und Schüler zusammengeführt werden kann, online zur Verfügung gestellt.

Die im Wissensrahmen angebotenen Themen sind weder erschöpfend noch so strukturiert, dass sie für eine bestimmte Altersgruppe in ihrer Gesamtheit behandelt werden müssen. Mit Ausnahme einiger einleitender Themen werden die meisten als eigenständige Themen verständlich sein und daher ein modulares System von Optionen zur Auswahl und Abstimmung entsprechend den Präferenzen der Lehrer und den Lernstilen und -zielen der Schülerinnen und Schüler darstellen. Das übergeordnete Ziel ist jedoch, dass die Kinder im Laufe ihrer Schulkarriere mit allen Themen vertraut werden.

Es muss betont werden, dass es nicht beabsichtigt ist, durch die Vermittlung des Faches Mikrobiologie und die Schaffung von Mikrobiologie-Fachleuten eine mikrobiologische Kompetenz zu schaffen. Vielmehr ist beabsichtigt, eine angemessene Wissensbasis genau jener mikrobiellen Aktivitäten zu vermitteln, die für die Befähigung der Gesellschaft zu Verbesserungen im täglichen Leben, für die evidenzbasierte Entwicklung von Richtlinien und für die planetarische Verwaltung von zentraler Bedeutung sind.

Und es ist wichtig, dass die Gesellschaft schnell begreift, dass das weit verbreitete Vorurteil, dass Mikroben unsere Feinde seien, nicht nur falsch ist, sondern auch gefährliche Verhaltenspraktiken hervorruft. Mikroben sind genau wie Menschen: Die meisten haben wenig oder keinen direkten Einfluss auf unser Leben, viele sind sehr nützlich und nur wenige sind für uns gefährlich. Und wie der Mensch sind es die Bösewichte, die Krankheiten oder materiellen Verfall verursachen, die die meiste Presse erhalten und über die wir am meisten wissen. Dennoch ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Mikroben als Ganzes als unsere Freunde dargestellt werden, da sie uns nicht nur im Stillen in unserem Leben helfen, sondern auch zur Lösung großer Probleme, wie z.B. der Erhöhung der Nahrungserträge, herangezogen werden können, und dass insbesondere die lebenswichtigen mikrobiellen 50% unserer eigenen Körperzellen als “engste Familie” dargestellt werden.

Es ist wichtig, dass das Wissen über Mikroben in der Gesellschaft erhöht wird, um den schädlichen Glauben und die Praxis der Mikrobenfeindlichkeit zu zerstreuen. Dies ist eine zentrale Botschaft der mikrobiologischen Kompetenzhilfe und wird in den Schullehrplänen an vorderster Front zum Einsatz kommen.

Lasst es uns tun!

*Makro*organismen - Tiere und Pflanzen - sind nicht nur wichtige Mitglieder der Biosphäre, sondern auch integrale Bestandteile der menschlichen Gesellschaft, der Evolution, der Zivilisation und der menschlichen Psyche selbst. Als domestizierte Arten bieten sie Nahrung, Ballaststoffe, Komfort,

Vergnügen und Wohlbefinden und als wilde Arten Quellen für Wunder, Hobbys und Vielfalt. Die Erhaltung der *Makro*organismen ist unsere vorrangige Verantwortung. Folglich ist die Biologie - im Wesentlichen die Tier- und Pflanzenbiologie - seit jeher ein Kernbereich der Bildung, sowohl als eigenständiges Fach als auch als Grundlage für den Unterricht in Humanbiologie und für die Fortpflanzungserziehung. Das Interesse der Bevölkerung an *Makro*organismen und die Wertschätzung für diese Organismen hat in den letzten Jahren durch die Blockbuster-Fernsehdokumentationen von David Attenborough enorm zugenommen (https://www.theatlantic.com/science/archive/2016/05/every-episode-of-david-attenboroughs-life-series-ranked/480678/-episode-of-david-attenboroughs-life-s-ranked/480678/).

Im Gegensatz dazu sind Mikroben aufgrund ihrer Größe für die breite Öffentlichkeit meist unsichtbar - aus den Augen, aus dem Sinn - also in der Regel nicht auf Radarschirmen zu sehen, außer wenn sie ein nachrichtenwürdiges Chaos verursachen, wie z.B. AIDS, Ebola und “rote Flut”. Diese unsichtbare Komponente der Biosphäre wird in der allgemeinen Bildung weitgehend vernachlässigt. Dennoch haben in jüngster Zeit erstaunliche Entdeckungen über Mikroben und ihre vielfältigen Einflüsse auf die Biologie und das Verhalten des Menschen das Bewusstsein für Mikroben in der allgemeinen Bevölkerung deutlich erhöht. Trotzdem bleiben Mikroben im Wesentlichen abstrakte Gebilde, die weniger verständlich sind als das Internet und zeigen damit auch, wie das Gedächtnis des Menschen arbeitet. Aber ihre Bedeutung ist unermesslich grösser als das Internet - wir haben ohne Internet überlebt, bis es kam, aber wir hätten ohne unsere mikrobiellen Lebenserhaltungssysteme niemals überleben können. Es ist daher von wesentlicher Bedeutung, dass die mikrobielle Welt in ihrer erstaunlichen, inhärenten, aber mikroskopischen Schönheit von der Abstraktion zur bildlichen Wahrnehmung und Substanz übergeht und ihren rechtmäßigen Platz in der menschlichen Psyche einnimmt. Visuelle Hilfsmittel werden daher im Mittelpunkt des Kompetenzkurses stehen, und die explodierende Arena der mikrobiellen Kunst (z.B. https://www.bbc.com/news/uk-england-oxfordshire-45099420) wird die Phantasie anregen. Es muss zur Routine werden, dass unsere Kinder, wenn über Mikroben gesprochen wird, diese sofort vor ihren geistigen Augen sehen und sich vorstellen können, was sie tun. Wenn die Mikroben aus dem Abstrakten heraustreten und Gestalt annehmen, werden sie real; Kinder werden ihre Lieblinge haben! Zu den kuscheligen Teddybären und wolligen Schafen gesellen sich der dampfende Methano, der gerissene Wolbo und die stachelige Kieselalge, die alle ihre individuellen (anthropozentrischen) Charaktere von agilen Spielzeugherstellern zugewiesen bekommen. Sie könnten in nicht allzu ferner Zukunft sogar zu TV-Zeichentrick-Favoriten werden.

Dieses Editorial verfolgt drei grundlegende Ziele, die in Abb. 1 in den Kontext gestellt werden, nämlich die Einführung von Themen der *mikrobiologischen Kompetenz* in die Lehrpläne der Schulen.

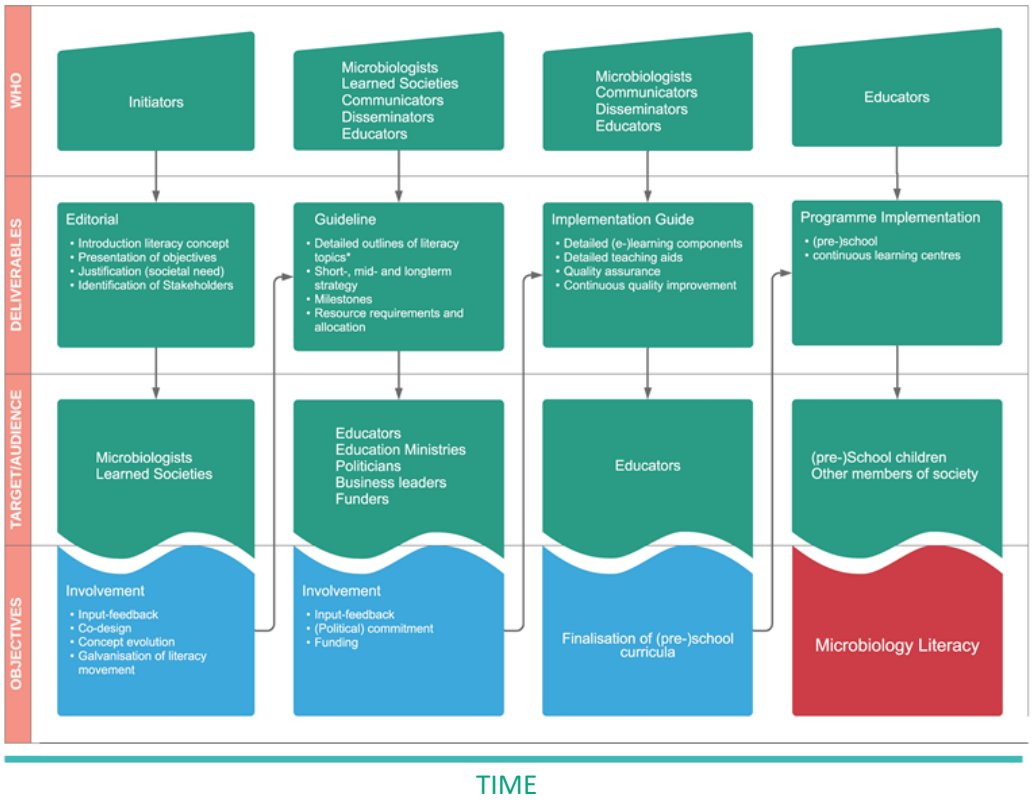


Abbildung 1

Mikrobiologische Kompetenzinitiative.

* Mikrobiologie-Ausbildung in Schule und Vorschule: ein erfahrungszentrierter Rahmen für Kinder, *Timmis, K. N. et al*., in Vorbereitung.

Das erste Ziel besteht darin, die entscheidenden Wissens- und Kompetenzdefizite in der Gesellschaft aufzudecken, die erforderlich sind, um angemessene, evidenzbasierte Entscheidungen zu einer Vielzahl persönlicher und gesellschaftlicher Fragen zu treffen, und die Argumente für eine *mikrobiologisch gebildete* Gesellschaft zu präsentieren, die durch die Einbeziehung eines Rahmens von mikrobiologischen Schlüsselthemen in die Grundausbildung erreicht werden sollen.

Das zweite Ziel besteht darin, Mikrobiologen, mikrobiologische Fachgesellschaften und mikrobiologisch gebildete Fachleute zu ermutigen, sich an dieser Initiative zu beteiligen und zu ihr beizutragen, indem sie den grundlegenden Rahmen weiterentwickeln, Ideen und Materialien für Themen, Videos und Klassenexperimente beisteuern und Mittel für die Schaffung der notwendigen Lehrmittel und -materialien entwickeln und suchen.

Und das dritte, wichtigste Ziel dieses Editorials ist es, Mikrobiologen, mikrobiologische Fachgesellschaften und Fachleute mit mikrobiologischem Wissen, die Kontakt zu und Einfluss auf Pädagogen, Politiker, Wirtschaftsführer, relevante Regierungs- und Nichtregierungsorganisationen und andere haben, dazu zu bewegen, ihre Kräfte in einer internationalen Anstrengung zu bündeln, um diese Vermittler von der entscheidenden Notwendigkeit zu überzeugen, mikrobiologische Kompetenz in der Gesellschaft zu erreichen *(wir alle sind Interessenvertreter der planetarischen und menschlichen Gesundheit: können wir es uns wirklich leisten, eine bedeutende Grundlage unserer Fähigkeit zur*

Lösung aktueller Krisen zu ignorieren?), und sie davon zu überzeugen, sich für die nächste Stufe, die Umsetzung, einzusetzen. Um dies zu erleichtern, haben wir in diesem Editorial, wo immer möglich, Fachbegriffe vermieden, so dass es für mehrere Zielgruppen verwendet werden kann.

Danksagung

Diese Initiative baut auf früheren Bemühungen inspirierender Mikrobiologen auf, die die grundlegende Notwendigkeit erkannten, die mikrobiologische Bildung in unseren Gesellschaften zu verbessern. Indem sie das Bewusstsein für das Thema schärften und ausgezeichnete, kindgerechte Texte und vielfältige Lehrmaterialien schufen, die in die Lehrpläne für den Mikrobiologieunterricht integriert werden können und deren Entwicklung erleichtern, legten sie eine hervorragende Grundlage.

Referenzen

Bach, J.-F. (2018) The hygiene hypothesis in autoimmunity: the role of pathogens and commensals. Nat Rev Immunol 18: 105–120.
Bartlett, J.G. (1979) Antibiotic-associated pseudomembranous colitis. Rev Infect Dis 1: 530–539.
Bergey, D.H. (1916) The pedagogics of bacteriology. J Bacteriol 1: 5–14.
Brown, J.M., and Hazen, S.L. (2015) The gut microbial endocrine organ: bacterially derived signals driving cardiometabolic diseases. Annu Rev Med 66: 343–359.
Brüssow, H. (2017) Infection therapy: the problem of drug resistance – and possible solutions. Micro Biotech 10:1041–1046.
Cabello, F.C. (2006) Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment. Environ Microbiol 8: 1137–1144.
Caselli, E. (2017) Hygiene: microbial strategies to reduce pathogens and drug resistance in clinical settings. Micro Biotech 10: 1979–1983.
Christen, V., Kunz, P.Y., and Fent, K. (2018) Endocrine disruption and chronic effects of plant protection products in bees: can we better protect our pollinators? Environ Pollut 243: 1588–1601.
Curtis, T. (2006) Microbial ecologists : it's time to 'go large'. Nat Rev Microbiol 4: 488.
de Lorenzo, V. (2017) Seven microbial bio-processes to help the planet. Micro Biotech 10: 995–998.
de Lorenzo, V., Marliere, P., and Sole, R. (2016) Bioremediation at a global scale: from the test tube to planet Earth. Micro Biotech 9: 618–625.
Du Toit, A. (2019) The gut microbiome and mental health. Nat Rev Microbiol 17: 196. https://doi.org/10.1038/s41579-019-0163-z.
Falkow, S. (1970) Antibiotics in animal feeds. N Engl J Med 282: 693–694.
Falkow, S. (1975) Infectious Multiple Drug Resistance. London: Pion Ltd.
Falkow, S., Marmur, J., Carey, W.F., et al. (1961) Episomic transfer between Salmonella typhosa and Serratia marcescens.Genetics 46: 703–706.
Finlay, B.B., and Arrieta, M.-C. (2016) Let them Eat Dirt. Vancouver, B.C., Canada: Greystone Books.
Garcia, J.L., de Vicente, M., and Galan, B. (2017) Microalgae, old sustainable food and fashion neutraceuticals. Micro Biotech 10: 1017–1024.
Gilbert, J.A., Knight, R., and Blakeslee, S. (2017) Dirt is Good. New York, USA: St Martin's Press.
Gilbert, J.A., and Yee, A.L. (2016) Is triclosan harming your microbiome? Science 353: 348–334.
Godfray, H.C., Blacquière, T., Field, L.M., et al. (2015) A restatement of recent advances in the natural science evidence base concerning neonicotinoid insecticides and insect pollinators. Proc Biol Sci 282: 20151821.

Gomez de Agüero, M., Ganal-Vonarburg, S.C., Fuhrer, T., et al. (2016) The maternal microbiota drives early postnatal innate immune development. Science 351: 1296–1302.
Hobbie, S.E., Finlay, J.C., Janke, B.D., Nidzgorski, D.A., Millet, D.B., and Baker, L.A. (2017) Contrasting nitrogenand phosphorus budgets in urban watersheds and implication for managing urban water pollution. Proc Natl Acad Sci U S A 114: 4177–4182.
Lane, S., Noni, E., MacDonald, N.E., Marti, M., and Dumolard, L. (2018) Vaccine hesitancy around the globe: analysis of three years of WHO/UNICEF joint reporting form data-2015–2017. Vaccine 36: 3861–3867.
Lee, S.Y., Kim, H.U., Chae, T.U., Cho, J.S., Kim, J.W., Shin, J.H., et al. (2019) A comprehensive metabolic map for production of bio-based chemicals. Nat Catal 2: 18–33.
Levy, S.B. (1982) Microbial resistance to antibiotics. An evolving and persistent problem. Lancet 2: 83–88.
Levy, S.B., FitzGerald, G.B., and Macone, A.B. (1976) Spread of antibiotic-resistant plasmids from chicken to chicken and from chicken to man. Nature 260: 40–42. Microbial Biotechnology. (2017) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. Micro Biotech 10: 979–1274.
Milani, C., Duranti, S., Bottacini, S., et al. (2017) The first microbial colonizers of the human gut: composition, activities, and health implications of the infant gut microbiota. Microbiol Mol Biol Rev 81: e00036–e00017.
Monneret, C. (2017) What is an endocrine disruptor? Comptes Rend Biol 340: 403–405.
Moossavi, S., Miliku, K., Sepehri, S., Khafipour, E., and Azad, M.B. (2018) The prebiotic and probiotic properties of human milk: implications for infant immune development and pediatric asthma. Front Pediatr 6: 197. https://doi.org/10.3389/fped.2018.00197.
Motta, E.V.S., Raymann, K., and Moran, N.A. (2018) Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. Proc Natl Acad Sci U S A 115: 10305–10310.
Nakatsuji, T., Chen, T.H., Butcher, A.M., Trzoss, L.L., Nam, S.J., Shirakawa, K.T., et al. (2018) A commensal strain of Staphylococcus epidermidis protects against skin neoplasia. Sci Adv 4: eaao4502.
Nielsen, P.H. (2017) Microbial biotechnology and circular economy in wastewater treatment. Micro Biotech 10: 1102–1105.
Richards, S., Paterson, E., Withers, P.J.A., and Stutter, M. (2015) The contribution of household chemicals to environmental discharges via effluents: combining chemical and behavioural data. J Environ Manage 150: 427–434.
Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., et al. (2009) A safe operating space for humanity. Nature 461: 472–475.
Rossen, N.G., MacDonald, J.K., de Vries, E.M., D'Haens, G. R., de Vos, W.M., Zoetendal, E.G., and Ponsioen, C.Y. (2015) Fecal microbiota transplantation as novel therapy in gastroenterology: a systematic review. World J Gastroenterol 21: 5359–5371.
Savage, A.F., and Jude, B.A. (2014) Starting small: using microbiology to foster scientific literacy. Trends Microbiol 22: 365–367.
Scalas, D., Roana, J., Mandras, N., et al. (2017) The Microbiological@mind project: a public engagement initiative of Turin University bringing microbiology and health education into primary schools. Int J Antimicrob Agents 50: 588–592.
Sender, R., Fuchs, S., and Milo, R. (2016) Are we really vastly outnumbered? Revisiting the ratio of bacterial to host cells in humans. Cell 164: 337–340.
Sharma, A., and Gilbert, J.A. (2018) Microbial exposure and human health. Curr Opin Microbiol 44: 79–87.

Timmis, K.N., de Lorenzo, V., Verstraete, W., et al. (2017a) The contribution of microbial biotechnology to economic growth and employment creation. Micro Biotech 10: 1137–1144.
Timmis, K.N., de Vos, W.M., Ramos, J.L., et al. (2017b) The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. Micro Biotech 10: 984–987.
Trinh, P., Zaneveld, J.R., Safranek, S., and Rabinowitz, P.M. (2018) One health relationships between human, animal, and environmental microbiomes: a mini-review. Front Public Health 30: 235. https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00235.
Trivedi, P., Schenk, P.M., Wallenstein, M.D., and Singh, B.K. (2017) Tiny microbes, big yields: enhancing food crop production with biological solutions. Micro Biotech 10: 999–1003.
Verstraete, W., and de Vrieze, J. (2017) Microbial biotechnology with major potentials for the urgent environmental needs of the next decades. Micro Biotech 10: 988–994.
Wampach, A., Heintz-Buschart, J., Fritz, V., Ramiro-Garcia, J., Habier, J., et al. (2018) Birth mode is associated with earliest strain-conferred gut microbiome functions and immunostimulatory potential. Nat Commun 9: 5091.
Wang, B., Yao, M., Lv, L., Ling, Z., and LI, L. (2017) The human microbiota in health and disease. Engineering 3: 71–82.
Watanabe, T. (1963) Infective heredity of multiple drug resistance in bacteria. Bacteriol Rev 27: 87–115.
Watanabe, T. (1966) Infectious drug resistance in enteric bacteria. N Engl J Med 275: 888–894.
Whipps, J.M., Lewis, K., and Cooke, R.C. (1988) Mycoparasitismand plant disease control 161–187 . In Fungi in Biological Control Systems, Burge, N.M. (ed). Manchester, UK.: Manchester University Press, p. 176.
zur Hausen, H., Bund, T., and de Villiers, E.M. (2017) Infectious agents in bovine red meat and milk and their potential role in cancer and other chronic diseases. Curr Top Microbiol Immunol 407: 83–116.