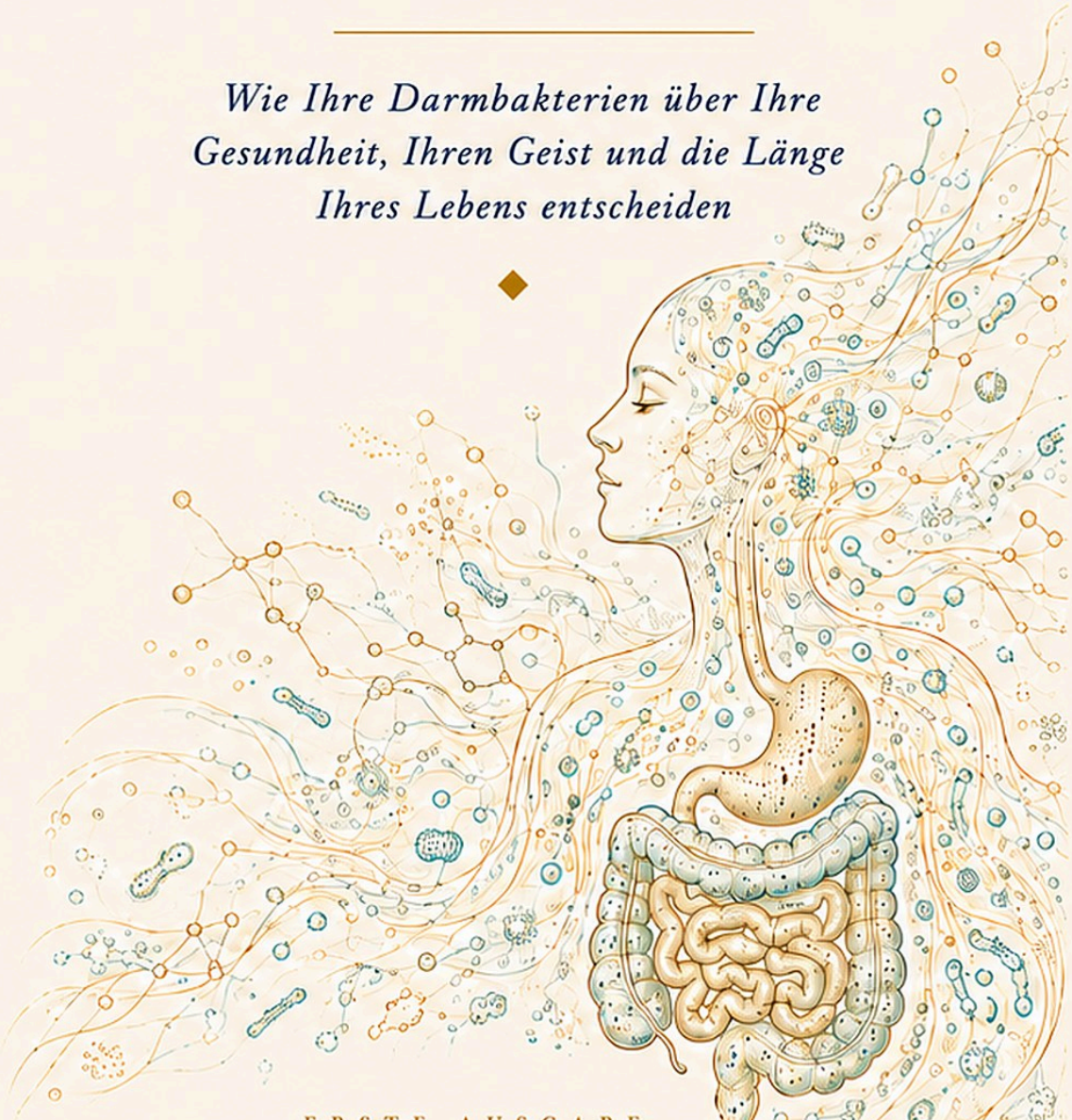
RADIM KAUFMANN UND BERNHARD MANN

DER DARM-CODE

Wie Ihre Darmbakterien über Ihre Gesundheit, Ihren Geist und die Länge Ihres Lebens entscheiden



ERSTE AUSGABE

LESEPROBE | ZWEITE AUSGABE | REDAKTIONELLER STAND

DER DARM-CODE

Wie Ihre Darmbakterien über Ihre Gesundheit,
Ihren Geist und die Länge Ihres Lebens entscheiden

♦

RADIM KAUFMANN
und
BERNHARD MANN

Zweite Ausgabe
Prag · 2026

DER DARM-CODE

Wie Ihre Darmbakterien über Ihre Gesundheit, Ihren Geist und die Länge Ihres Lebens entscheiden

Zweite Ausgabe

Zweite Ausgabe cht im Jahr 2026 von Radim Kaufmann, Prag.

Copyright © 2026 Radim Kaufmann und Bernhard Mann.

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf reproduziert, in einem Datenabrufsystem gespeichert oder in irgendeiner Form oder mit irgendeinem Verfahren — elektronisch, mechanisch, durch Fotokopie, Aufzeichnung oder anderweitig — ohne die vorherige schriftliche Genehmigung des Herausgebers übertragen werden, ausgenommen kurze Zitate, die in kritischen Artikeln und Rezensionen verwendet werden.

Genehmigungsanfragen und Anliegen richten Sie bitte an den Autor unter *www.radimkaufmann.com*.

Über die Autoren. Die Autoren sind unabhängige Autoren und Analytiker wissenschaftlicher Informationen. Sie sind keine Ärzte, Diätologen oder lizenzierten medizinischen Fachkräfte. Dieses Buch ist eine Synthese aus veröffentlichter wissenschaftlicher Literatur, fachlich geprüften Forschungsarbeiten, historischem Kontext und analytischer Interpretation und ist für Bildungszwecke bestimmt. Es ist keine medizinische Beratung.

Unabhängig veröffentlicht. Umschlag- und Innengestaltung von den Autoren.

WWW.RADIMKAUFMANN.COM

Medizinischer Hinweis

Medizinischer Haftungsausschluss. Die in diesem Buch enthaltenen Informationen werden ausschließlich zu allgemeinen Bildungs- und Informationszwecken präsentiert. Sie sind nicht als medizinische Beratung, Diagnose oder Behandlung gedacht und dürfen nicht als solche herangezogen werden. Die hier diskutierte Mikrobiomforschung ist ein sich rasch entwickelndes Feld; Empfehlungen, die auf diesen Seiten erscheinen, können durch zukünftige Forschung präzisiert, eingeschränkt oder stellenweise revidiert werden. Leser mit bestimmten Erkrankungen oder gesundheitlichen Sorgen sollten vor jeder Änderung von Ernährung, Bewegung, Medikamenten oder Nahrungsergänzungsmitteln einen qualifizierten Arzt konsultieren und nicht auf der Grundlage von Aussagen in diesem Buch handeln, ohne zuvor individuelle ärztliche Beratung eingeholt zu haben. Die Autoren und der Herausgeber lehnen jede Haftung für negative Folgen ab, die direkt oder indirekt aus der Nutzung oder dem Missbrauch der hier präsentierten Informationen entstehen könnten.

Für unsere Familien, die uns lehrten, dass Gesundheit
am Tisch geformt wird.

Und für die Leser, deren Fragen
im Laufe der Jahre allmählich zu diesem Buch wurden.

Worte der Autoren

Einige Worte darüber, wie dieses Buch aufgebaut ist und welche Konventionen wir in seinen fünfundzwanzig Kapiteln verwenden.

Dieses Buch ist ein Werk der Synthese. Wir beide — schreibend zwischen Prag und Wien — verbinden unabhängige Forschung, Sichtung der wissenschaftlichen Literatur und ein langjähriges Interesse an Mikrobiomforschung. Wir sind keine Ärzte oder zugelassenen Mediziner; wir sind Wissenschaftsautoren und unabhängige Analytiker wissenschaftlicher Informationen. Was folgt, ist unsere Lesart dessen, was die aktuelle Literatur über das menschliche Mikrobiom tatsächlich gezeigt hat.

Den Haupttext jedes Kapitels haben wir gemeinsam verfasst. Jedes Kapitel ging in den Jahren 2025 und 2026 mehrfach zwischen Prag und Wien hin und her, bis Wissenschaft, historische Szenen und praktische Implikationen mit der Sorgfalt behandelt waren, die das Thema verdient. Das Ergebnis ist eine einheitliche, integrierte Stimme. Am Ende jedes Kapitels jedoch tritt einer von uns in einem kurzen Abschnitt namens *Worte des Autors* hervor — die Zuschreibung wechselt durch das Buch hindurch und wird jedes Mal angegeben.

Das Buch ist in fünf Teile gegliedert: Grundlagen des Mikrobioms; der Körper in Dysbiose; was die moderne Zivilisation dem menschlichen mikrobiellen Ökosystem angetan hat; die Wissenschaft der Langlebigkeit und der gegenwärtigen Therapie; und die praktische Synthese, wie man ein widerstandsfähiges Ökosystem über das Erwachsenenleben hinweg aufbaut.

Ein Wort zur Evidenz. Wo sie stark ist, ist die Sprache direkt. Wo die Befunde Hinweise liefern, aber noch nicht eindeutig sind, macht auch die Sprache diese Unsicherheit sichtbar. Wo sie wirklich umstritten ist, sagen wir es. Jedes Kapitel endet mit nummerierten Anmerkungen, die die wichtigsten wissenschaftlichen Quellen dokumentieren.

Nichts in diesem Buch ist ärztlicher Rat. Leser mit konkreten gesundheitlichen Anliegen sollten einen qualifizierten Arzt konsultieren, bevor sie nach irgendetwas hier Geschriebenem handeln. Dieses Buch ist kein Diätplan, kein Wellness-Manifest und kein Werbedokument. Es ist eine Landkarte des Terrains.

— Radim Kaufmann

— Bernhard Mann

Prag und Wien, 2026

Inhaltsverzeichnis

Einleitung — Sie sind kein einzelner Organismus 9

Teil I · Grundlagen

1. Das vergessene Organ 15
2. Die Entstehung des Mikrobioms 31
3. Die Bakterien, die die Zivilisation aufbauten 47
4. Die Darm–Hirn-Verbindung 66
5. Das zweite Immunsystem 86

Teil II · Der Körper in Dysbiose

6. Adipositas und das hungrige Mikrobiom 108
7. Diabetes und der Zuckerstoffwechsel 128
8. Entzündung: Das stille Feuer 149
9. Krebs und das mikrobielle Schlachtfeld 169
10. Das alternde Mikrobiom 190

Teil III · Der moderne Übergriff

11. Der Tod der Vielfalt 209
12. Ultraverarbeitete Lebensmittel 229
13. Antibiotika: Wunder und Katastrophe 249
14. Stress, Schlaf und Cortisol 269
15. Alkohol, Rauchen und moderne Gewohnheiten 289

Teil IV · Die Wissenschaft der Langlebigkeit

16. Die Blue Zones 310

17. Fasten und Autophagie 331
18. Probiotika, Präbiotika und Mythos 351
19. Die Zukunft der personalisierten Medizin 372
20. Transplantationen und die Zukunft der Therapie 393

TEIL V · WIEDERAUFBAU DES MENSCHLICHEN ÖKOSYSTEMS

21. Was wir essen sollten 413
22. Bewegung und der lebende Körper 435
23. Kinder und die nächste Generation 456
24. Können wir den Schaden umkehren? 477
25. Der zukünftige Mensch 499
Schluss — Das Ökosystem in uns 519

— Anhänge und Register —

Anhang A — Wichtige Mikrobiom-Arten und ihre Funktionen 527
Anhang B — Glossar 535
Anhang C — Ernährungsmuster und wissenschaftliche Befunde 545
Anhang D — Zeitleiste der wichtigsten Entdeckungen 552
Anhang E — Empfohlene wissenschaftliche Lektüre 561
Anhang F — Mikrobiom-Artenatlas 567
Bibliografie 572
Über die Autoren 582
Danksagung 585
Index 588

EINLEITUNG

Sie sind kein einzelner Organismus

Den größten Teil der Menschheitsgeschichte hindurch glaubten wir, der menschliche Körper gehöre ganz uns. Unsere Gedanken gehörten uns. Unser Hunger gehörte uns. Unsere Krankheiten gehörten uns. Unsere Gefühle gehörten uns. Unser Überleben, so schien es, hing von der Kraft unserer Organe ab, von der Qualität unseres Blutes und von der Widerstandsfähigkeit unseres Geistes.

Die moderne Medizin hatte das Herz beschrieben, die Lungen erforscht und das Gehirn vermessen. Am Ende des zwanzigsten Jahrhunderts hatte sie sogar das menschliche Genom selbst kartiert.[1] Und doch blieb fast während dieser ganzen Geschichte eines der wichtigsten Systeme im menschlichen Körper nahezu vollständig unsichtbar.

Im Inneren jedes Menschen lebt ein enormes Ökosystem aus Bakterien, Archaeen, Pilzen, Viren und mikroskopischen Organismen, das gemeinsam als *Mikrobiom* bezeichnet wird. Die meisten von ihnen leben im Magen-Darm-Trakt — insbesondere im Dickdarm —, wo Dutzende Billionen mikrobieller Zellen kontinuierlich mit dem Immunsystem, dem Stoffwechsel, den Hormonen, der Entzündung und sogar dem Gehirn interagieren.[2]

Diese Organismen sind keine bloßen Mitreisenden. Sie helfen, Nahrung zu verdauen. Sie produzieren Vitamine. Sie regulieren Entzündung. Sie formen Immunantworten. Sie beeinflussen die Insulinempfindlichkeit. Sie wirken auf das Körpergewicht. Sie kommunizieren chemisch mit dem Nervensystem. Sie können Stimmung, Stress, Angst und kognitiven Abbau beeinflussen. Einige Wissenschaftler glauben heute, dass sie sogar die Geschwindigkeit beeinflussen können, mit der Menschen altern.

In rein numerischer Hinsicht ist der menschliche Körper weniger individuell, als wir einst dachten. Ein gesunder Erwachsener trägt etwa so viele Bakterienzellen wie eigene Zellen — jahrelang galt die Zahl von zehn Bakterien auf jede unserer eigenen, aber eine sorgfältige Neuberechnung aus dem Jahr 2016 aus dem Labor von Ron Milo am Weizmann-Institut revidierte das Verhältnis nach unten auf etwas, das eher eins-zu-eins entspricht.[3] Die bakteriellen *Gene* im Darm überwiegen die menschlichen Gene jedoch weiterhin um einen außergewöhnlichen Faktor: etwa das 150-fache.[4] Das Ökosystem im Körper verhält sich weniger wie eine einfache Infektion, die es zu beseitigen gilt, und mehr wie ein Regenwald, ein Ozean oder eine planetarische Biosphäre, deren Gleichgewicht darüber entscheidet, ob der Wirt überleben kann.

Sie sind kein einzelner Organismus. Sie sind ein Ökosystem.

Diese Erkenntnis verändert die moderne Medizin still, aber grundlegend.

Mehr als ein Jahrhundert lang betrachtete die Medizin Bakterien vor allem als Feinde. Die großen Siege der Medizin des zwanzigsten Jahrhunderts — Antibiotika, Sterilisation, Impfstoffe, moderne Chirurgie — erwuchsen aus dem Krieg der Menschheit gegen Infektionskrankheiten. Millionen von Leben wurden gerettet. Ganze Zivilisationen wurden sicherer.

Doch beim Gewinn dieses Krieges hat die moderne Zivilisation möglicherweise auch einen Teil des biologischen Systems beschädigt, das die Menschen Hunderttausende von Jahren gesund gehalten hatte. Industrielle Nahrung veränderte die mikrobielle Vielfalt. Urbane Hygiene veränderte die Umweltexposition. Antibiotika störten uralte Ökosysteme im Darm. Moderner Stress formte die hormonelle Biologie neu. Schlafentzug, ultraverarbeitete Lebensmittel, Alkohol, Rauchen, Adipositas und chronische Entzündung begannen auf eine Weise mit dem Mikrobiom zu interagieren, die keine frühere menschliche Generation erlebt hatte.

Gleichzeitig erlebte die moderne Welt ein explosionsartiges Wachstum von Krankheiten, die einst vergleichsweise selten waren: Adipositas, Typ-2-Diabetes, Autoimmunerkrankungen, chronisch entzündliche Darmerkrankungen, Allergien, Depression, metabolisches Syndrom und neurodegenerative Erkrankungen.

Kein seriöser Wissenschaftler glaubt, dass das Mikrobiom allein all diese Erkrankungen erklärt. Aber nur wenige seriöse Wissenschaftler würden heute behaupten, dass es damit überhaupt nichts zu tun hat.

Die Mikrobiom-Revolution ist noch jung.

Viele Behauptungen sind übertrieben. Einige sind kommerziell manipuliert. Die Wellness-Industrie bewegt sich oft schneller als die Evidenz. Ganze Märkte verkaufen heute Produkte für „Darmgesundheit", die auf unvollständiger, vereinfachter oder in manchen Fällen schlicht falscher Wissenschaft basieren.

Dieses Buch ist kein Plädoyer für Pseudowissenschaft. Es ist kein Detox-Manifest. Es ist keine medizinfeindliche Ideologie. Es ist der Versuch, eine der wichtigsten Verschiebungen in der modernen Biologie sorgfältig und mit angemessener Demut zu verstehen.

Das Feld der Mikrobiomforschung steht heute am Schnittpunkt von Medizin, Neurowissenschaft, Immunologie, Ernährung, Alterungsforschung, Evolutionsbiologie, Stoffwechsel, künstlicher Intelligenz und personalisierter Medizin. Die Folgen sind weitreichend. Zum ersten Mal in der Geschichte der Biomedizin beginnt das Feld zu akzeptieren, dass die menschliche Gesundheit nicht nur von menschlichen Zellen, sondern auch von einem riesigen ökologischen System abhängen kann, das in uns lebt.

Wir haben uns diesem Thema nicht als Ärzte genähert. Wir sind keine Gastroenterologen. Wir sind keine Mikrobiologen. Wir sind keine klinischen Forscher.

Unser Zugang zu diesem Thema ist ein anderer: Systeme, Muster, Komplexität und die Beobachtung, wie zerbrechliche Strukturen mit der Zeit versagen. Je tiefer wir uns in die moderne Stoffwechselerkrankung, Entzündung, Adipositas, Diabetes und das Altern hineinlasen, desto häufiger tauchte unter der Oberfläche ein unsichtbares Muster auf: Das Ökosystem selbst veränderte sich. Die Bakterien, die im Inneren moderner Menschen lebten, lebten nicht mehr unter den Bedingungen, die die menschliche Biologie im Verlauf der Evolution geformt hatten. Und vielleicht zahlen die modernen Menschen den Preis dafür.

Dieses Buch wurde für ein breites Publikum geschrieben, nicht für Spezialisten. Aber es wurde auch mit tiefem Respekt vor wissenschaftlicher Strenge geschrieben. Die Haupterzählung ist bewusst zugänglich. Die Anmerkungen

und die Bibliographie sind bewusst fachlicher gehalten. Im gesamten Buch findet der Leser Verweise auf fachlich geprüfte Forschung, historische medizinische Entwicklungen, Mikrobiom-Sequenzierungsstudien, klinische Studien, epidemiologische Beobachtungen und neue Hypothesen von der Forschungsfront der Langlebigkeitswissenschaft.

Einige hier diskutierte Entdeckungen könnten sich später als unvollständig erweisen. Einige könnten sich als revolutionär erweisen. Die Wissenschaft entwickelt sich gerade deshalb weiter, weil Gewissheit vorübergehend ist.

Aber eine Tatsache scheint bereits unumgänglich: Menschen sind biologisch weit weniger unabhängig, als wir einst glaubten.

Die Zukunft der Medizin beginnt vielleicht nicht in den Sternen, nicht in der künstlichen Intelligenz und nicht einmal in der Genetik allein. Sie könnte im Inneren der unsichtbaren Zivilisation beginnen, die bereits in uns lebt.

ANMERKUNGEN ZUR EINLEITUNG

1. Das Humangenomprojekt verkündete im Juni 2000 einen Sequenzentwurf und veröffentlichte im Februar 2001 zwei nahezu vollständige Entwürfe (Lander et al., *Nature*; Venter et al., *Science*). Ein wirklich „telomer-zu-telomer" lückenloses menschliches Genom wurde erst 2022 vom T2T-Konsortium fertiggestellt. Siehe Nurk et al., „The complete sequence of a human genome", *Science* 376 (2022).

2. Für einen verständlichen Überblick über das Mikrobiom als System siehe Knight, *Follow Your Gut* (2015), und Yong, *I Contain Multitudes* (2016). Für eine fachlichere Synthese siehe Cho und Blaser, „The human microbiome: at the interface of health and disease", *Nature Reviews Genetics* 13 (2012): 260–270. DOI: 10.1038/nrg3182.

3. Sender, Fuchs und Milo, „Revised Estimates for the Number of Human and Bacteria Cells in the Body", *PLOS Biology* 14 (8): e1002533 (2016). Die klassische Zahl 10:1 stammt aus einer Schätzung von Thomas Luckey aus dem Jahr 1972 und wurde Ende der 1970er Jahre von Dwayne Savage popularisiert; die Milo-Arbeit zeigte, dass sorgfältiges Zählen ein Verhältnis ergibt, das eher bei 1,3:1 liegt, was die Autoren als „im Wesentlichen eins-zu-eins" beschreiben.

4. Das 150-fache Verhältnis in der Genzahl stammt aus der wegweisenden Katalogisierung mikrobieller Gene des menschlichen Darms durch das MetaHIT-Konsortium: Qin et al., „A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing", *Nature* 464 (2010): 59–65 (DOI: 10.1038/nature08821). Der Katalog hat sich seitdem erheblich erweitert; siehe Almeida et al., *Nature Biotechnology* 39 (2021): 105–114 (DOI: 10.1038/s41587-020-0603-3).



KAPITEL EINS

Das vergessene Organ

„Da sah ich dann, mit größter Verwunderung, dass in der besagten Materie viele sehr kleine lebende Tierchen waren, die sich sehr hübsch bewegten."

— Antonie van Leeuwenhoek, Brief an die Royal Society of London, 17. September 1683

Im September 1683 setzte sich in der niederländischen Stadt Delft ein Tuchhändler an seine Werkbank, hob ein kleines Instrument seiner eigenen Konstruktion zum Licht und drehte die Fokussierschraube. Das Instrument war so groß wie eine Briefmarke. Es bestand aus einer einzelnen geschliffenen Glaslinse, die zwischen zwei dünnen Messingplatten befestigt war, mit einer winzigen Öffnung, durch die die Linse eine Probe betrachten konnte, die hinter ihr auf einer Nadel aufgespießt war. Der Tuchhändler, dessen Name Antonie van Leeuwenhoek war, hatte im Hinterzimmer seines Geschäftes mehr als zweihundert solcher Geräte gebaut, und einige davon waren so fein geschliffen, dass sie Objekte von weniger als zwei Tausendsteln Millimeter auflösen konnten. Niemand sonst in Europa konnte sehen, was er sah.[1]

An jenem Morgen hatte Leeuwenhoek beschlossen, sich die weiße Materie anzusehen, die er zwischen seinen eigenen Zähnen abgekratzt hatte. Sie hatte ihn jahrelang interessiert. Er hatte bemerkt, dass sie sich an manchen Morgen schneller ansammelte als an anderen. Er vermutete — und hatte damit recht —, dass sie lebendig war.

Er drückte ein Stückchen des Materials gegen die Nadel, führte die Linse an sein Auge und wartete, bis sich das Bild scharf stellte.

Was er sah, beschrieb er später sorgfältig in einem Brief an die Royal Society of London: „kleine Tierchen" — er nannte sie *Animalcules* —, die in den wässrigen Abkratzungen seines Mundes in gewaltigen und unwahrscheinlichen Mengen umherschwammen. Manche bewegten sich in langsamen, würdevollen Bögen.

Andere „schossen durch das Wasser, wie ein Hecht durch es hindurch schießt“. Eine dritte Art drehte sich in engen, energischen Kreisen. Die Zahlen waren unfassbar. Mit der philosophischen Gelassenheit eines Krämers aus dem siebzehnten Jahrhundert schloss er, dass „im Schmutz auf den Zähnen im Mund eines Menschen mehr Lebewesen leben als Menschen in einem ganzen Königreich“.[2]

Es war das erste Mal, dass ein Mensch jemals deutlich ein Bakterium gesehen hatte.

Als der Brief eintraf, war die Royal Society nicht völlig überzeugt. Sie konsultierte ihre eigenen Mikroskopiker. Sie bat Leeuwenhoek, Zeichnungen zu schicken. Sie schickte Beobachter nach Delft. Über Jahre der Korrespondenz hinweg gelangte sie zu der Akzeptanz, dass Leeuwenhoek die Wahrheit sagte: Im menschlichen Körper lebten Organismen, die zu klein waren, um mit bloßem Auge gesehen zu werden, in Mengen, die sich zuvor niemand vorgestellt hatte.

Dann, für die nächsten zwei Jahrhunderte, geschah fast nichts.

Es lohnt sich, bei der Seltsamkeit dieser Tatsache innezuhalten. Leeuwenhoek hatte ein Phänomen identifiziert, das wir heute als eines der wichtigsten biologischen Systeme der Erde verstehen. Ein motivierter Beobachter mit auch nur bescheidenen Werkzeugen hätte seine Arbeit im Prinzip im darauffolgenden Jahr wiederholen können. Und doch sollte das, was wir heute Mikrobiologie nennen — das systematische Studium der Organismen, die Leeuwenhoek sah —, fast zweihundert Jahre lang nicht erfunden werden. Das menschliche Mikrobiom als ernstes Objekt medizinischer Aufmerksamkeit musste doppelt so lange warten.

Warum?

Zum Teil deshalb, weil die Instrumente noch nicht gut genug waren, um das Feld produktiv zu machen. Leeuwenhoeks Linsen waren handwerkliche Meisterwerke, aber er weigerte sich, seine Schleiftechniken zu teilen, und eine Generation lang erreichte kein Nachfolger seine Auflösung. Das achromatische Mikroskop — das farbkorrigierte Bilder bei hoher Vergrößerung erzeugen konnte — kam erst in den 1820er Jahren.[3] Bis dahin war die Welt, die Leeuwenhoek beschrieben hatte, für fast jeden nur Hörensagen.

Aber der tiefere Grund ist konzeptueller Natur. Das achtzehnte Jahrhundert hatte keinen Rahmen für die Idee, dass ein gesunder menschlicher Körper ein Lebensraum sein könnte. Krankheit wurde als Ungleichgewicht verstanden — der Säfte, der Konstitution, der Lebensführung. Das Wort *Infektion* in seinem modernen Sinn existierte noch nicht. Bakterien, wenn sie überhaupt in Betracht gezogen wurden, waren Kuriositäten; ihre Beziehung zur Krankheit war unklar, und ihre Beziehung zur Gesundheit war schlicht keine Frage, die man stellen sollte.

Als die Frage schließlich kam, in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts, kam sie als Krieg.

DER KRIEG GEGEN DIE KEIME

Zwischen ungefähr 1860 und 1900 gelang es einer Handvoll Persönlichkeiten — Louis Pasteur in Frankreich, Joseph Lister in Schottland, Robert Koch in Deutschland —, das zu etablieren, was heute die *Keimtheorie* der Krankheit genannt wird. Pasteur zeigte mit einer Folge wunderschön entworfener Experimente zum Weinverderb und zur Seidenraupenseuche, dass spezifische Mikroben spezifische Wirkungen erzeugten. Lister übertrug das Prinzip auf die Chirurgie, indem er sein Operationsfeld in Karbolsäure tränkte und beobachtete, wie die postoperative Sterblichkeit zusammenbrach. Koch arbeitete sich methodisch eine Liste der größten Töter herab — Milzbrand, Tuberkulose, Cholera — und zeigte, dass für jeden ein bestimmter Bazillus verantwortlich war. Bis 1884 hatte er die berühmten vier Postulate formalisiert, die die medizinische Mikrobiologie im nächsten Jahrhundert regieren sollten.[4]

Der Triumph war so vollständig, so moralisch sauber und so verdient, dass er prägte, wie die westliche Medizin das gesamte zwanzigste Jahrhundert hindurch über Bakterien dachte. Mikroben verursachen Krankheit. Die Eliminierung der Mikroben verhindert Krankheit. Die Mikrobe war standardmäßig der Feind.

Innerhalb dieses Rahmens war die Idee, dass ein gesunder Erwachsener Billionen Bakterien in seinem oder ihrem eigenen Darm beherbergen könnte — nicht als leichte Infektion, nicht als Kontamination, sondern als konstitutiver Teil der Biologie —, schwer in Erwägung zu ziehen. Der Rahmen hatte dafür

keinen Platz. Als Ärzte im späten neunzehnten Jahrhundert entdeckten, dass ein gesunder menschlicher Darm von Mikroben wimmelte, war die häufigste Interpretation, dass diese Mikroben sicherlich Schaden anrichten müssen. Der deutsche Kinderarzt Theodor Escherich, der 1885 als Erster das kultivierte, was später *Escherichia coli* genannt werden sollte, aus den Stuhlproben gesunder Säuglinge, war sorgfältig genug darauf hinzuweisen, dass der Organismus paradoxerweise mit ihrer robusten guten Gesundheit zusammenzuleben schien.[5] Die Beobachtung wurde abgelegt. Sie veränderte den Rahmen nicht.

Der Rahmen lieferte jedoch eines der großen Geschenke des zwanzigsten Jahrhunderts. In den 1940er Jahren war die Keimtheorie zur Antibiotikamedizin gereift, und die wichtigsten Todesursachen erkulose, Lungenentzündung, Sepsis, Syphilis, Gasbrand — begannen auf eine Weise zurückzuweichen, die frühere Generationen für ein Wunder gehalten hätten. Hygiene, Impfung, Kühlung und Chlorung des kommunalen Wassers leisteten ihre eigenen enormen Beiträge. Die menschliche Lebenserwartung in den Industrieländern verlängerte sich in einer einzigen Generation um Jahrzehnte.[6]

Während dieses großen Sieges hielt fast niemand inne, um sich zu fragen, was sonst auf dem Weg getötet worden sein könnte.

DER VERGESSENE ABWEICHLER

Es gab eine Ausnahme, und sein Name war Ilja Metschnikow.

Metschnikow, ein in Russland geborener Zoologe, der schließlich stellvertretender Direktor des Pasteur-Instituts in Paris wurde, hatte die 1880er Jahre mit der Entdeckung verbracht, dass weiße Blutkörperchen eindringende Mikroben verschlingen — der grundlegende Mechanismus der zellulären Immunität, für den er 1908 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin teilen sollte.[7] Aber es war Metschnikows zweite Karriere, im ersten Jahrzehnt des zwanzigsten Jahrhunderts, die ihn zum seltsamen Großvater der Mikrobiomforschung machte.

Aus einem kleinen Labor in Paris arbeitend, war Metschnikow von der Frage besessen geworden, warum manche menschlichen Bevölkerungen außerordentlich lange und gesunde Leben zu führen schienen. Besonders faszinierten ihn

bulgarische Bauern, die angeblich eine ungewöhnliche Anzahl von Hundertjährigen hervorbrachten und deren Ernährung viel saure Milch umfasste. Metschnikow stellte die Hypothese auf, dass die Milchsäurebakterien in dieser fermentierten Milch — von denen eines, *Lactobacillus bulgaricus*, noch immer den Namen seines Herkunftslandes trägt —, die „fäulniserregenden" Bakterien im Dickdarm verdrängten und das verringerten, was er *Darm-Autointoxikation* nannte. Die Autointoxikationstheorie war im Detail falsch. Aber die zugrundeliegende Intuition — dass die Bakterien im menschlichen Darm etwas Wichtiges tun könnten und dass das, was sie tun, durch die Ernährung modifizierbar sein könnte —, war fast hundert Jahre vor ihrer Zeit.

Metschnikow legte das Argument in seinem Buch von 1907 *The Prolongation of Life: Optimistic Studies* (Die Verlängerung des Lebens: Optimistische Studien) dar.[8] Er trank jeden Tag fermentierte Milch. Er empfahl sie seinen Freunden. Er starb 1916 im Alter von einundsiebzig Jahren an Herzversagen, ohne die Mainstream-Medizin jemals ganz davon überzeugt zu haben, dass er einer wichtigen Sache auf der Spur war. Für den größten Teil des zwanzigsten Jahrhunderts wurde er als der Mann erinnert, der die Phagozytose entdeckt hatte. Die andere Hälfte seines Lebenswerks wurde als Exzentrik eines alternden Genies behandelt.

Es ist erwähnenswert, dass Metschnikow in grobem Umriss und mit einer einzigen diätetischen Intervention vieles vorwegnahm, was die letzten zwei Jahrzehnte der Mikrobiomforschung auf eine ernsthafte empirische Grundlage zu stellen begonnen haben: dass die Darmmikrobiota für die systemische Gesundheit von Bedeutung ist; dass sie von den Lebensmitteln, die wir essen, beeinflusst wird; dass Interventionen im frühen oder mittleren Lebensalter die Bahn des Alterns beeinflussen können; und dass sie in geringgradige Entzündung, Immunbalance und Langlebigkeit verwickelt sein könnten. Er hatte mit der Richtung recht. Er lag um hundert Jahre beim Zeitpunkt daneben.

Auch nach Metschnikow blieb der Darm für die Medizin ein Rohr. Die Lehrbuchfunktion des Dickdarms war die Aufnahme von Wasser aus unverdauten Nahrungsrückständen und die Speicherung von Abfall vor der Ausscheidung. Die Bakterien, wenn sie überhaupt erwähnt wurden, wurden entweder als sanitäres Problem oder als harmlose Kommensalen behandelt, die keine besondere Untersuchung verdienten.

Das intellektuelle Zögern hatte einen technischen Komplizen. Die Bakterien des menschlichen Dickdarms sind in der Sprache der Mikrobiologie *obligate Anaerobier* — das heißt, die meisten von ihnen sterben schnell, wenn sie atmosphärischem Sauerstoff ausgesetzt sind. Sie können nicht auf den Nähragar-Standardplatten gezüchtet werden, die Mikrobiologen zum Zählen anderer Bakterien verwenden. Viele von ihnen können außerhalb des Darms gar nicht kultiviert werden. Bis ins späte zwanzigste Jahrhundert hinein war die vielfältigste und reichhaltigste mikrobielle Gemeinschaft der Erde im praktischen Sinne für die Laborwissenschaft unsichtbar.[9]

Ein Bakterium, das nicht kultiviert werden kann, kann nicht untersucht werden. Es kann nicht benannt werden. Es kann nicht klassifiziert werden. Es kann nicht mit irgendeiner Zuversicht gezählt werden. Mikrobiologen, die vor etwa 1990 arbeiteten, schätzten auf der Grundlage der Plattenkultur, dass der menschliche Darm vielleicht ein paar hundert Bakterienarten enthielt. Die wahre Zahl, als sie messbar wurde, sollte sich als mehr als tausend herausstellen — und der Unterschied war keine Verfeinerung. Er war eine andere Größenordnung.[10]

WIE WIR SEHEN, WAS WIR NICHT ZÜCHTEN KÖNNEN

Der einzige technische Fortschritt, der den Darm der wissenschaftlichen Sicht öffnete, war die Anwendung der DNA-Sequenzierung auf ein Markergen namens *16S ribosomale RNA*. Dieses Gen, das in jedem Bakterium und jeder Archäe vorhanden ist, enthält Regionen, die in der gesamten Bakterienwelt nahezu identisch sind, und Regionen, die sich zwischen den Arten in hochinformativer Weise unterscheiden. Durch Extraktion aller DNA aus einer Stuhlprobe, Amplifikation des 16S-Gens und Sequenzierung der variablen Regionen kann ein Forscher eine Volkszählung darüber erstellen, welche Mikroben vorhanden sind und in welchen ungefähren Anteilen — ohne jemals einen einzigen Organismus zu kultivieren. Die Methode, die in den 1980er Jahren vom amerikanischen Mikrobiologen Carl Woese verfeinert und 2005 von Paul Eckburg, David Relman und Kollegen auf den menschlichen Darm angewandt wurde, ist die Grundlage von fast allem, was in diesem Buch folgt. 11

DAS WORT KOMMT AN

Das Wort *Mikrobiom* trat 2001 in den wissenschaftlichen Wortschatz ein, in einem Essay des Nobelpreisträgers Joshua Lederberg und seiner Mitarbeiterin Alexa T. McCray, die den Begriff vorschlugen, um „die ökologische Gemeinschaft kommensaler, symbiotischer und pathogener Mikroorganismen zu beschreiben, die buchstäblich unseren Körperraum teilen“.[12] Das Wort war neu, aber das Konzept, das Lederberg damit meinte, war — endlich — alt. Er beschrieb das System, das Leeuwenhoek dreihundertachtzehn Jahre zuvor in den Abkratzungen seiner Zähne erblickt hatte.

Was folgte, war ein außergewöhnliches Jahrzehnt wissenschaftlichen Aufholens. 2007 starteten die amerikanischen National Institutes of Health das Human Microbiome Project, ein bewusstes Sequenzierungsvorhaben, das methodisch und rhetorisch nach dem Human Genome Project modelliert war, das zu Beginn des Jahrzehnts abgeschlossen worden war.[13] Ein paralleles europäisches Konsortium, MetaHIT, sequenzierte die Darmmikrobiome von 124 europäischen Erwachsenen und veröffentlichte 2010 einen Katalog von 3,3

Millionen unterschiedlichen mikrobiellen Genen — etwa hundertfünfzig Mal die Anzahl der Gene im menschlichen Genom selbst.[14] Bis 2012 hatte das HMP einen Referenzsatz erstellt, der die bakteriellen Gemeinschaften von achtzehn Körperstellen bei 242 gesunden amerikanischen Erwachsenen charakterisierte.[15] Bis 2021 hatte ein integrierter Katalog, der aus fast 290.000 mikrobiellen Genomen zusammengestellt war, die Anzahl der identifizierten Bakterienarten im menschlichen Darm über 4.000 hinaus erhöht.[16]

Die Zahlen werden sich weiter bewegen. Sie sind nicht der Punkt. Der Punkt ist die Veränderung des Rahmens, die sie möglich machten.

Zum ersten Mal in der Geschichte der Medizin wurde es vernünftig, zu fragen, was eine ganze mikrobielle Gemeinschaft *tat*, anstatt zu fragen, was ein einzelner isolierter Organismus auf einer Petri-Schale tat. Die Verschiebung klingt bescheiden. In der Praxis war sie der Unterschied zwischen der Beschreibung eines Waldes durch Auflistung der Bäume, die man persönlich in einer freigeschlagenen Lichtung angetroffen hat, und der Beschreibung durch Kartierung jeder Art darin, einschließlich derer, die nur im tiefen Schatten leben.

EIN ORGAN, IN JEDER VERNÜNFTIGEN DEFINITION

Bis zum zweiten Jahrzehnt des einundzwanzigsten Jahrhunderts hatten Forscher begonnen, halb scherzhaft und dann immer ernsthafter, das Darmmikrobiom als „das vergessene Organ“ des menschlichen Körpers zu bezeichnen.[17] Der Ausdruck hat eine gewisse rhetorische Bequemlichkeit, aber er verdient mehr als rhetorischen Gebrauch. Das Argument dahinter verdient es, ernst genommen zu werden, denn wenn es richtig ist, verändert es die Art und Weise, wie Medizin für den Rest unserer Leben praktiziert werden sollte.

Ein Organ ist im konventionellen Sinne eine Struktur von Zellen, die organisiert sind, um identifizierbare Funktionen für den Körper als Ganzes auszuführen. Nach dieser Definition qualifiziert sich das Darmmikrobiom. Es führt die Verdauung komplexer Kohlenhydrate durch, die der menschliche Enzymapparat allein nicht aufspalten kann. Es kann bestimmte Vitamine synthetisieren, darunter Vitamin K und einige B-Vitamine; wie stark dies zum tatsächlichen Vitaminstatus beiträgt, hängt von Ernährung, Darmabschnitt und

individueller Mikrobiomzusammensetzung ab. Es produziert kurzkettige Fettsäuren, die die Zellen des Dickdarms als ihren primären Brennstoff verwenden. Es erhält die Integrität der Darmschleimhaut aufrecht. Es kalibriert die Reifung des Immunsystems von der Kindheit bis ins hohe Alter. Es kommuniziert über Metaboliten, Hormone und den Vagusnerv mit dem Gehirn. Es beeinflusst die Aufnahme und den Stoffwechsel von Pharmazeutika. Es interagiert mit zirkadianen Rhythmen, mit Stressreaktionen und mit der Regulierung des Körpergewichts.[18]

Das sind keine spekulativen Eigenschaften. Sie sind das dokumentierte Funktionieren eines Systems, das — wenn es aus menschlichen Zellen bestünde — in jedem medizinischen Lehrbuch dargestellt und an jeder medizinischen Hochschule des Landes zwei Semester lang gelehrt werden würde. Der Grund, warum es nicht so dargestellt wird, ist teils historische Trägheit und teils die Seltsamkeit, ein Organ zu beschreiben, das nicht aus menschlichem Gewebe besteht, das zwischen Individuen mehr variiert als jedes menschliche Organ und das innerhalb von Stunden durch eine Mahlzeit umgestaltet werden kann.

Es ist auch ein Organ, das beschädigt werden kann.

Das ist die Sorge, die vieles von dem, was in diesem Buch folgt, antreibt. Wenn das Darmmikrobiom in irgendeinem bedeutsamen Sinne ein Organ ist — eines, das sich mit dem menschlichen Wirt über Hunderttausende von Jahren koevolviert hat und das Funktionen erfüllt, für die der Wirt keinen inneren Ersatz hat —, dann sind die abrupten Veränderungen des letzten Jahrhunderts in der menschlichen Ernährung, in der menschlichen Medikation, in den menschlichen Geburtspraktiken, in der menschlichen Exposition gegenüber Boden und Tieren und in der chemischen Zusammensetzung der Umwelt keine geringfügigen Lebensstilfakten. Es sind Belastungen für ein System. Etwas von dem, was in der modernen Medizin aufgetaucht ist — der Anstieg von Autoimmunerkrankungen, die Adipositas-Epidemie, die Zunahme chronischer Entzündung, die Verdoppelung und Wiederverdoppelung des metabolischen Syndroms —, könnte ein nachgelagerter Effekt dieser Belastungen sein, und zwar auf Weisen, die selbst unsere besten klinischen Instrumente erst zu entdecken beginnen.

Oder vielleicht nicht. Die Wissenschaft ist noch nicht abgeschlossen. Aber sie ist jetzt ernst genug, dass kein ehrlicher Bericht über die menschliche Gesundheit sie auslassen kann.

Im Rest dieses Buches werden wir die wichtigsten Befunde, Kontroversen und offenen Fragen des Feldes durchgehen. Wir werden uns ansehen, was darüber bekannt ist, wie das Mikrobiom in der Säuglingszeit etabliert wird und wie es über ein menschliches Leben hinweg altert. Wir werden seine Rolle im Immunsystem, im Stoffwechsel, in der Stimmung, in der Entzündung und in der Krankheit untersuchen. Wir werden uns ansehen, was das moderne Leben — Antibiotika, ultraverarbeitete Lebensmittel, Alkohol, chronischer Stress, Schlafentzug — ihm antut. Wir werden uns ausführlich ansehen, was die Wissenschaft der Langlebigkeit über seine Rolle dabei nahegelegt hat, wie lange und wie gut Menschen leben können. Und wir werden uns ansehen, was, wenn überhaupt, wieder aufgebaut werden kann, sobald es beschädigt wurde.

Das Buch ist kein Handbuch. Es kommt eher einem langen Brief von einem neugierigen Leser an einen anderen gleich. Wo die Evidenz stark ist, ist die Sprache direkt; wo sie hinweisend ist, ist die Sprache vorsichtig; wo sie umstritten ist, werden beide Seiten zusammengefasst. Der Leser ist eingeladen, mit dem Autor an jedem beliebigen Punkt zu argumentieren.

Aber das Argument beginnt, denke ich, mit derselben Beobachtung, die Leeuwenhoek bei Kerzenlicht im Jahr 1683 machte.

In uns ist mehr als wir.

WORTE DES AUTORS — RADIM KAUFMANN

Ich bin zu diesem Material zufällig gekommen. Ich las über komplexe Systeme — die Art, die langsam und dann auf einmal versagt —, und ich hatte in jenem Jahr das Pech, auch zu viel über moderne chronische Erkrankungen zu lesen. Die beiden Literaturen kollidierten ständig. Die Autoimmunerkrankungen, die vor einem Jahrhundert selten gewesen waren, waren nicht mehr selten. Die Adipositasraten, die seit Ende der 1970er Jahre gestiegen waren, verlangsamten sich nicht. Die Depressionsstatistiken bei Jugendlichen taten etwas, wofür die

Kinderärzte der vorigen Generation keine Sprache hatten. Ich bin kein Arzt; ich hatte keine berufliche Pflicht, irgendetwas davon zu verstehen. Aber es gab ein Muster im zeitlichen Ablauf, das nicht losgelassen hat.

Was in der Literatur, als ich weiter las, immer wieder auftauchte, war der Darm. Nicht als einzige Antwort, sondern als wiederkehrende Fußnote. Eine Fußnote, die Jahr für Jahr näher an den Haupttext zu wandern schien. Die Stücke, die mich am meisten interessierten, waren diejenigen, in denen sorgfältige Kliniker Befunde beschrieben, die sie noch nicht vollständig verstanden — eine unerwartete Korrelation zwischen einer bestimmten Bakterienart und einem bestimmten metabolischen Ergebnis, eine klinische Studie, die nicht so funktionierte, wie das Protokoll vorhergesagt hatte, eine Transplantation von Stuhl von einem Menschen in einen anderen, die eine zuvor unheilbare Infektion heilte. Solche Schreibarbeit zieht mich an, in jedem Feld. Sie bedeutet gewöhnlich, dass sich das zugrundeliegende Bild noch nicht stabilisiert hat, was paradoxerweise der Zeitpunkt ist, dem es sich zu schenken lohnt.

Ich denke nicht, dass das Mikrobiom alles erklärt. Die Wellness-Industrie hat bereits eine ungerechtfertigt selbstbewusste Industrie auf der Prämisse aufgebaut, dass sie es tut, und ich habe versucht, ein Buch zu schreiben, das diesem Haufen nicht weiteres hinzufügt. Aber ich denke, es erklärt *etwas* — wahrscheinlich mehr, als die Mainstream-Medizin bisher absorbiert hat, und sicherlich mehr, als es einer Institution recht ist, die ein Jahrhundert lang Bakterien vor allem als Feinde behandelt hat.

Vor allem aber bin ich zu der Ansicht gelangt, dass der menschliche Körper nicht das wohldefinierte Objekt ist, als das wir ihn beiläufig annehmen. Wir sind, alle von uns, weniger individuell, als das Wort *Individuum* impliziert. Was in uns lebt, formt, was wir sind. Und was wir tun, uns selbst und der Welt, aus der wir essen, formt sie im Gegenzug.

Je länger ich mit dieser Idee saß, desto mehr schien es des Aufschreibens wert.

— Radim Kaufmann

ANMERKUNGEN ZU KAPITEL 1 — DAS VERGESSENE ORGAN

1. Zu Leeuwenhoeks Instrumenten und Methoden siehe Brian J. Ford, „The Discovery of Bacteria“, *American Society for Microbiology News* 60 (1994); und Lesley Robertson, *Antoni van Leeuwenhoek: Master of the Minuscule* (Brill, 2016). Von den etwa 500 Mikroskopen, die Leeuwenhoek mutmaßlich gebaut hat, sind nur neun erhalten geblieben; das qualitativ hochwertigste Überlebende, im Utrechter Museum, erreicht etwa 270× Vergrößerung mit einer Auflösung, die ausreicht, um die größeren Bakterien zu sehen.

2. Leeuwenhoek, Brief vom 17. September 1683 an die Royal Society, übersetzt in Clifford Dobell, *Antony van Leeuwenhoek and His „Little Animals“* (Russell & Russell, 1932; Neuausgabe Dover, 1960), 238–247. Das Zitat im Epigraph stammt aus diesem Brief. Die Wendung „mehr Tiere als Menschen in einem ganzen Königreich“ war nach moderner Zählung eine erhebliche Unterschätzung.

3. Das achromatische Verbundmikroskop, das die chromatische Aberration korrigierte, die frühere Instrumente plagte, wurde unabhängig von Joseph Jackson Lister (Vater des Chirurgen Joseph Lister) in den 1820er Jahren entwickelt. Siehe M. Bracegirdle, *A History of Microtechnique* (Cornell, 1978).

4. Robert Koch, „Die Ätiologie der Tuberkulose“, *Mittheilungen aus dem Kaiserlichen Gesundheitsamte* 2 (1884): 1–88. Die vier Postulate wurden in der Arbeit von 1884 formalisiert, hatten sich aber bereits seit Kochs Arbeit zu Milzbrand von 1876 in seinem Denken entwickelt.

5. Theodor Escherich, „Die Darmbakterien des Neugeborenen und Säuglings“, *Fortschritte der Medizin* 3 (1885): 515–522, 547–554. Escherich

nannte den Organismus *Bacterium coli commune*; 1919 wurde er ihm zu Ehren in *Escherichia coli* umbenannt.

6. Zum Beitrag öffentlicher Gesundheitsmaßnahmen versus medizinischer Interventionen zum Rückgang der Sterblichkeit im 20. Jahrhundert siehe Thomas McKeown, *The Modern Rise of Population* (Academic Press, 1976), und die erhebliche nachfolgende Debatte; für eine neuere Neubewertung siehe Samuel Preston, „The Changing Relation between Mortality and Level of Economic Development", *Population Studies* 29 (1975).

7. Der Nobelpreis von 1908 wurde zwischen Metschnikow und Paul Ehrlich für „ihre Arbeit zur Immunität" geteilt. Metschnikows Entdeckung der Phagozytose wird in Alfred I. Tauber, *Metchnikoff and the Origins of Immunology* (Oxford, 1991) geschildert.

8. Ilja Metschnikow, *The Prolongation of Life: Optimistic Studies*, übers. P. Chalmers Mitchell (G. P. Putnam's Sons, 1908). Die französische Originalausgabe *Essais Optimistes* erschien 1907.

9. Zur praktischen und konzeptuellen Schwierigkeit der Kultivierung von Darmanaerobiern siehe Robert E. Hungate, „A Roll Tube Method for the Cultivation of Strict Anaerobes", in *Methods in Microbiology* 3B (Academic Press, 1969). Hungates Technik, die zur Untersuchung von Pansenbakterien bei Rindern entwickelt wurde, war die Grundlage für spätere anaerobe Kultivierungsarbeiten am menschlichen Darm.

10. Vergleiche die Artenverzeichnisse der präsequenzierenden Übersichten (z. B. Sherwood Gorbachs Artikel der 1970er Jahre) mit den postsequenzierenden Verzeichnissen von Eckburg et al. (2005), Qin et al. (2010) und Almeida et al. (2021), alle weiter unten zitiert. Letztere schätzen etwa 4.000–5.000 unterschiedliche Bakterienarten im menschlichen Darm mit erheblicher individueller Variation.

11. Paul B. Eckburg et al., „Diversity of the Human Intestinal Microbial Flora", *Science* 308 (2005): 1635–1638 (DOI: 10.1126/science.1110591). Zur ursprünglichen Entwicklung der phylogenetischen 16S-rRNA-Analyse siehe

Carl R. Woese und George E. Fox, „Phylogenetic Structure of the Prokaryotic Domain: The Primary Kingdoms“, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 74 (1977): 5088–5090.

12. Joshua Lederberg und Alexa T. McCray, „‘Ome Sweet ’Omics: A Genealogical Treasury of Words“, *The Scientist* 15 (7) (2001): 8. Der Begriff *Mikrobiota*, der sich auf die Organismen selbst und nicht auf ihr kollektives Genom bezieht, war etwas früher in der Bodenökologie in Gebrauch.

13. Jane Peterson et al., „The NIH Human Microbiome Project“, *Genome Research* 19 (2009): 2317–2323. Das HMP wurde im Rahmen des NIH Common Fund finanziert und lief in seiner ersten Phase von 2007 bis 2014. DOI: 10.1101/gr.096651.109.

14. Junjie Qin et al. (MetaHIT-Konsortium), „A Human Gut Microbial Gene Catalogue Established by Metagenomic Sequencing“, *Nature* 464 (2010): 59–65. DOI: 10.1038/nature08821.

15. The Human Microbiome Project Consortium, „Structure, Function and Diversity of the Healthy Human Microbiome“, *Nature* 486 (2012): 207–214; sowie der begleitende Artikel „A Framework for Human Microbiome Research“ in derselben Ausgabe. DOI: 10.1038/nature11234.

16. Alexandre Almeida et al., „A Unified Catalog of 204,938 Reference Genomes from the Human Gut Microbiome“, *Nature Biotechnology* 39 (2021): 105–114. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Buches wurde dieser Katalog durch Metagenom-Assemblies aus weiteren Kohorten erheblich erweitert. DOI: 10.1038/s41587-020-0603-3.

17. Die Wendung erscheint in Anne O’Hara und Fergus Shanahan, „The Gut Flora as a Forgotten Organ“, *EMBO Reports* 7 (2006): 688–693, der ersten breit zitierten Übersicht, die das Argument ausdrücklich vorbringt und die noch immer lesenswert ist. DOI: 10.1038/sj.embor.7400731.

18. Für einen umfassenden neueren Überblick über die in diesem Absatz aufgeführten Funktionen siehe Lloyd-Price, Abu-Ali und Huttenhower, „The healthy human microbiome“, *Genome Medicine* 8 (2016): 51; sowie

die enzyklopädische Lehrbuchbehandlung in Marchesi (Hrsg.), *The Human Microbiota and Microbiome* (CABI, 2014).