

Thomas C. G. Bosch

# Die Unentbehrlichen – Mikroben, des Körpers verborgene Helfer

Warum sind so viele  
Menschen krank?

Antworten aus der  
Mikrobiomforschung

SACHBUCH

 Springer

# Die Unentbehrlichen – Mikroben, des Körpers verborgene Helfer

Thomas C. G. Bosch

# Die Unentbehrlichen – Mikroben, des Körpers verborgene Helfer

Warum sind so viele Menschen  
krank? Antworten aus der  
Mikrobiomforschung



Springer

Thomas C. G. Bosch  
Zoologisches Institut  
Christian-Albrechts-Universität  
zu Kiel  
Kiel, Deutschland

ISBN 978-3-662-65082-0      ISBN 978-3-662-65083-7 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-65083-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Covermotiv: © stock.adobe.com/Jesper/ID 31749306  
Covergestaltung: deblik, Berlin

Planung/Lektorat: Stefanie Wolf  
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.  
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# Vorwort

Während ich diese Zeilen schreibe, steckt ein großer Teil der Welt mitten in der Corona-Pandemie. Alle Aufmerksamkeit ist auf die Implementierung von strengen Hygienemaßnahmen fokussiert. Diese Hygienemaßnahmen sind jetzt absolut notwendig. Sie werden aber ganz erhebliche Auswirkungen auf die Fülle an Mikroorganismen haben, die in unserem Körper leben. Ohne sie werden wir krank und können nicht überleben. Sie sind unentbehrlich und gewiss auch unserer Fürsorge wert.

In diesem Buch werde ich erläutern, dass wir alle schon immer in einer mikrobiellen Welt gelebt haben, dass die Mikroben einen großen Einfluss auf alle Facetten unserer Existenz haben und dass die Anwesenheit einer bunten Mischung von Mikroben in unserem Körper für unsere Gesundheit und Fitness von herausragender Bedeutung sind. Trotz des Schadens und der Turbulenzen, die COVID-19 bereits weltweit verursacht hat, sollten wir

daher nicht vergessen, dass eine erhöhte Hygiene auch zu mikrobiellen „Kosten“ führen wird, weil die Funktionalität unseres Mikrobioms dadurch erheblich verringert wird. Auch die gegenwärtige Pandemie macht daher deutlich, dass ein vielfältiges Mikrobiom ein wesentlicher Baustein unserer Gesundheit ist.

Der Tag, an dem ich realisierte, dass das Entstehen und Funktionieren von vielzelligem Leben ohne ein Zutun von Mikroben undenkbar ist, war ein grauer Oktobertag im Jahr 2011. Margaret McFall-Ngai und Michael G. Hadfield, zwei bekannte Symbioseforscher aus Hawaii, hatten im amerikanischen Durham zu einem Treffen eingeladen, um über den Ursprung und die Evolution von Interaktionen zwischen Tieren und Mikroben nachzudenken. Uns allen war zu diesem Zeitpunkt bereits bewusst, dass tierische und menschliche Gewebe mit einer Fülle von Mikroben besiedelt sein können. Treffpunkt war das National Evolutionary Synthesis Center (NESCent) in Durhams Stadtzentrum, dem früheren Tabakdistrikt. Einer der Teilnehmer dieses zukunftsweisenden Treffens, das gemeinsam von der Duke University, der University of North Carolina in Chapel Hill, der North Carolina State University sowie der National Science Foundation (NSF) unterstützt wurde, war Andy H. Knoll, ein international bekannter Paläontologe aus Harvard. Andy machte mit wenigen Worten klar, dass das, was ich seit zwei Jahrzehnten versuchte zu verstehen, nämlich die Entstehung einfacher vielzelliger Organismen vor etwa 560 Millionen Jahren, nur vor dem Hintergrund einer mindestens 3,5 Milliarden Jahre alten Besiedlung der Erde mit Mikroben zu begreifen ist – und dass daher jede Entwicklung und alle Lebensformen Spuren dieser Vergangenheit in und mit sich tragen. Das Treffen in Durham kam zur rechten Zeit. In der Biologie bahnten sich gerade ein fundamentaler Paradigmenwechsel und eine neue Ära an, in der das

ganzheitliche Verständnis komplexer Lebensprozesse als Zusammenspiel einer Vielzahl von Organismen im Vordergrund steht. Ein grundsätzliches Verständnis dieses Organisationsprinzips gewinnt zunehmend an Bedeutung, da es auch zu einem besseren Verständnis einer Fülle von modernen und chronischen Krankheiten führen wird.

### **Organismen, und damit auch Patienten, existieren nur als Metaorganismen**

Natürlich war der ganzheitliche Blick auf den Organismus, ob Pflanze, Tier oder Mensch, unter Berücksichtigung der Umwelt, in der der Organismus lebt, schon immer Voraussetzung zur Erkundung fundamentaler Prozesse des Lebens. Für lange Zeit aber war dieser Blick mangels besserer Werkzeuge strikt fokussiert auf einzelne Gewebe, Organe und Zellen. In den vergangenen Jahrzehnten dominierte die disziplinentorientierte Forschung. Mit ihrem reduktionistischen Herangehen an die Aufklärung der Vorgänge in einem Organismus war die Überzeugung verbunden, dass er sich aufgrund seiner erkennbaren Konstituenten hinreichend erklären lässt. Ganzheitliche Ansätze traten in den Hintergrund. Wie wir alle wissen, war dieses Vorgehen zunächst äußerst erfolgreich. Neue Techniken und schließlich der Einzug der Molekularbiologie haben in den letzten 50 Jahren faszinierende Einblicke in das Funktionieren von komplexen Organismen einschließlich des Menschen gegeben. War im Jahr 1992 das Buch von Peter A. Lawrence *Das Herstellen einer Fliege* (Originaltitel: *The Making of a Fly*) für mich noch eine Provokation – versteht man jetzt, wie eine Fliege gemacht wird? –, so wissen wir heute um die Signale, die Signaltransduktionswege und die innerzellulären Kontrolleure, die es braucht, um aus einem Embryo ein komplexes und

an seine Umwelt angepasstes Lebewesen zu machen. Für die Entdeckung von Schlüsselprinzipien der Embryonalentwicklung wurde 1995 der Nobelpreis für Medizin vergeben, auch deshalb, weil sich bald herausstellte, dass die Entdeckungen in der Taufliede Allgemeingültigkeit haben, da die genetischen Steuerungsmechanismen im Laufe der Evolution im Großen und Ganzen unverändert geblieben sind. Und auch wenn wir heute zwar noch immer nicht vollkommen verstehen, wie eine Fliege gemacht wird, so kennen wir doch von vielen der beteiligten Signalfaktoren selbst die atomare Struktur, wissen, wie die Faktoren an dazugehörige Rezeptoren binden und wie die Zellen auf einen derart aktivierten Rezeptor reagieren. Heute ist nicht nur die gesamte Erbsubstanz von einer großen Zahl von Pflanzen und Tieren bekannt. Wir verstehen auch sehr genau, wie Regulatoren an diese Erbsubstanz binden, wie die Erbsubstanz selber „epigenetisch“ verändert werden kann und wie sich das alles auf das Heranwachsen des Embryos auswirkt. Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen diskutieren „die molekulare Architektur des Lebens“ und darüber, wie wir mit diesem Wissen in Zukunft umgehen können. Tiefer in der Analyse als zu den atomaren Bausteinen, der molekularen Architektur der Lebensprozesse, geht es wohl nicht mehr?

**Neue Technologien lassen Unsichtbares sichtbar werden: Die Ära des Mikrobioms**

Und doch haben wir beim vermeintlich tiefen Blick in die Zusammensetzung und das Funktionieren von Geweben ganz Wesentliches übersehen: Auf allen unseren Epithelien und in den meisten unserer Organe leben Milliarden von Mikroben. Die Hochdurchsatz-Sequenzierung und neuartige bildgebende Verfahren lassen erkennen, dass sich in



unseren Geweben und Organen, im Darm, in der Mundhöhle und auf der Haut, neben unserer eigenen Erbinformation eine Fülle von genetischen Fußabdrücken entdecken lassen, die unzählig vielen Mikroorganismen (z. B. Bakterien, Pilze, Viren, Archaeobakterien) zugeordnet werden können. Die enormen Fortschritte in der Bioinformatik und bei den Sequenzierungsmethoden haben Unsichtbares sichtbar werden und ein neues Forschungsfeld, die sogenannte Mikrobiomforschung, entstehen lassen. Die Publikationen dazu sind unzählig. Auch meine Arbeitsgruppe hat das Ihrige dazu beigetragen, seit wir uns an einem einfachen Versuchstier, dem Süßwasserpolyphen Hydra, um ein funktionelles Verständnis der Rolle der Mikroben bemühen. Auch als Zoologe habe ich dabei immer den Menschen im Blick. Gilt das, was wir in einfachen Organismen entdecken, auch für unseren Körper? Ich bin Fellow im Canadian Institute for Advanced Research (CIFAR) im Programm „Human and the Microbiome“ und leite den Sonderforschungsbereich 1182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Ursprung und Funktionieren von Metaorganismen“. Was mich bei diesen Arbeiten erreicht hat, ist in das vorliegende Buch eingeflossen.

In Teil I werde ich beschreiben, dass Mikroben in Pflanzen und Tieren nicht nur allgegenwärtig sind; Bakterien, Viren und Wirtszellen verbinden sich zu „Metaorganismen“ und stellen eine Einheit dar, die über die Grenzen von Individuen und Arten hinweg die Funktion und die Entwicklung von Lebewesen bestimmt. Der Metaorganismus reguliert mit fein justierten molekularen Werkzeugen des angeborenen Immunsystems und einer ausgeprägten zwischenartlichen Kommunikation die Zusammensetzung und Funktionsfähigkeit seiner Mitspieler. Funktionen und Aufgaben

können dabei auf assoziierte Partner übertragen werden. Seine modulare Zusammensetzung erlaubt es dem Metaorganismus, rasch und situationsbedingt auf Änderungen in der Umwelt zu reagieren.

Während die Mikrobiomforschung versucht, die im Metaorganismus ablaufenden Interaktionen zu verstehen, füllen sich die Wartezimmer von Ärztinnen und Ärzten (und auch die Tierarztpraxen) mit Patienten, die an chronischen Erkrankungen leiden, die es in dieser Häufigkeit vor 50 Jahren nicht gab. Die Medizin spricht dabei von sogenannten komplexen Erkrankungen. Oft werden sie auch Lifestyle- oder Umwelterkrankungen bezeichnet. Zu diesen Volkskrankheiten zählen die chronisch entzündlichen Darmerkrankungen, Allergien, Asthma, Adipositas und metabolisches Syndrom wie auch neurologische Erkrankungen. Eine stetig steigende Zahl an Patienten ist davon betroffen. Bis heute gibt es gegen keine dieser Erkrankungen ein dauerhaftes Heilmittel oder eine wirksame Präventionsmaßnahme. Ein gestörtes Mikrobiom im Darm vieler dieser Patienten und auch der häufig erfolgreiche Einsatz der Stuhltransplantation deuten daraufhin, dass die Abwesenheit der Bakterien oder auch die Störung der normalen Bakterienzusammensetzung mitverantwortlich ist für das Auftreten der neuen und komplexen Erkrankungen. Haben wir daher beim vermeintlich tiefen Blick in die Zusammensetzung und das Funktionieren von Geweben etwas Wesentliches übersehen? Ist der blinde Fleck der Medizin die immer noch unterschätzte und auch noch nicht tief verstandene Rolle der Mikroben?

In Teil II werde ich erklären, dass sich derzeit die Mikrobiomforschung und der Fokus auf den Metaorganismus zu einem spannenden neuen Forschungsgebiet entwickeln, in dem Expertinnen und Experten

unterschiedlicher Disziplinen zusammenarbeiten, um tieferen Einblick in die Interaktionen zwischen Wirt (Tier, Mensch und Pflanze) und den besiedelnden Mikroben zu gewinnen.

Wir sind viele, denn die Mikroorganismen und ihre Gene sind nicht nur einfache Gäste in unserem Körper: Sie sind ständige Mitbewohner und ein essenzieller Teil von uns. Sie beeinflussen nicht nur, ob wir krank oder gesund sind, sondern haben auch Zugriff auf unsere beiden Schaltzentralen im Körper, das Gehirn und den Darm. In diesem Teil des Buches werde ich auch über die vielleicht wichtigste (und für mich aufregendste) Erkenntnis der Mikrobiomforschung berichten: Mikroben, die in großer Zahl unseren Darm besiedeln, reden direkt mit unseren Nervenzellen. Viele kleine Stoffwechselprodukte der Mikroben landen auf Oberflächenrezeptoren von Nervenzellen. Eine mögliche Konsequenz davon ist, dass wir dann unser Verhalten ändern. Das zeigt sich besonders plakativ, wenn etwa Mäuse mutiger werden, nachdem ihnen eine bestimmte Bakterienmischung verabreicht wurde. Symbiotische Mikroben sind daher nicht nur an Stoffwechselprozessen und der Entwicklung des Immunsystems beteiligt; sie beeinflussen auch zentralnervöse Leitungen und unser Verhalten. Hier stellt sich dann die Frage: Wer redet da eigentlich mit wem? Die Mikroben mit unseren Zellen im Gehirn? Oder wir mit den Mikroben?

Die Mikrobiomforschung hat längst die reine Beschreibung der komplexen Wechselbeziehungen hinter sich gelassen und ist auf einem guten Weg, fundamentale und daher kausale Zusammenhänge aufzudecken. Sind es die Interaktionen im Metaorganismus, die bei so vielen kranken Menschen nicht mehr richtig funktionieren? Sind die sogenannten „komplexen“ Erkrankungen

eine Konsequenz unserer modernen Lebensweise, eine Konsequenz der ständigen Störung des Gleichgewichts, der Homöostase zwischen uns und unseren Mikroben, die sich im Laufe unserer Stammesgeschichte eingestellt hat? Und schlimmer noch: Sind wir vielleicht schon unfähig geworden, uns an geänderte Umweltbedingungen anzupassen, weil uns die dazu notwendige mikrobielle Unterstützung bereits abhandengekommen ist?

In Teil III werde ich die neue Sichtweise auf die Organismen vertiefen und die Perspektiven erweitern, indem ich auf neue Forschungsansätze hinweise, die auf die Aufrechterhaltung eines gesunden Mikrobioms gerichtet sind (können wir unseren Helfern helfen?). Wir müssen lernen, uns als Metaorganismus zu begreifen, als eine Lebensgemeinschaft mit zahllosen Mit- und Gegenspielern. Jede Entfremdung und Trennung der Mitglieder dieser Lebensgemeinschaft und jede Reduzierung der Zahl ihrer Mitspieler sind von Nachteil. Ich habe bereits vor Jahren darauf hingewiesen, dass wir erst dann die Widerstandsfähigkeit und Belastbarkeit gegenüber einer sich ständig ändernden Umwelt erreichen, wenn wir uns als Teil von multiorganismischen Netzwerken begreifen und loslassen von der Idee, wonach der menschliche Körper ausschließlich aus menschlichen Zellen besteht.

Was bedeutet das für das Selbstverständnis der Menschen, wenn Mikroben unser Verhalten mitbestimmen können? Können wir noch genau entscheiden, wo der Mensch aufhört und wo die Mikroben anfangen? Dieses Verschwimmen und Unschärfwerden von klar definierten Grenzen gilt übrigens auch für das Immunsystem, das nach klassisch traditionellem Verständnis die Aufgabe hat, in unserem Körper zwischen „selbst“ und „fremd“ zu unterscheiden und so Krankheitskeime zu bekämpfen. Die Mikrobiomforschung hat aber ganz

klar dokumentiert, dass manche Bakterien, die ja eindeutig „fremde“, weil genetisch von uns verschiedene Zellen sind, einen wichtigen Teil unseres ureigenen Immunsystems darstellen. Mikroben verhindern das Eindringen von Pathogenen und sind voll in das Signalsystem des Immunsystems integriert. Die Frage, was im Leben zählt, ist wahrlich nicht neu. Aber macht uns die Mikrobiomforschung darauf aufmerksam, dass das Ganze auf dem Spiel steht, wenn die Mikroorganismen fehlen? Wie unentbehrlich sind die Mikroben also wirklich? Wie kommt man den Zusammenhängen auf die Spur? Und welche Schlüsse können wir daraus ziehen?

Das sind alles spannende und noch ungelöste Fragen in einem komplexen Wissenschaftsbereich. Und wie wir uns entwickeln, ob und wie wir gesund bleiben oder krank werden, das ist und bleibt ein großes Thema für jeden von uns, oder? Dabei wird aber leider die Differenz zwischen dem, was die Öffentlichkeit weiß, und dem, was gerade in den Wissenschaften so passiert, immer größer. Mit diesem Buch geht es mir daher um das Einführen in die Wissenswelten der Wirt-Mikrobiom-Forschung, um verblüffende Einsichten und das Vergnügen an der Erkenntnis, warum und wie wir als Metaorganismus funktionieren.

Sie können dieses Buch von vorn bis hinten durchlesen oder aber kapitelweise hineinschnuppern und die 22 Kapitel in beliebiger Reihenfolge lesen. Wenn alles gut geht, sollte sich in Ihrem Kopf dann automatisch das Bild „Mensch und Mikrobiom gehören zusammen“ ergeben.

Viel Spaß beim Lesen!

# Danksagung

Nachdem ich jahrelang mit dem Projekt „Die Unentbehrlichen“ gelebt habe, gilt es, vielen Menschen zu danken für wunderbare Gespräche, Anregungen, kritische Einwände und gute Zusammenarbeit.

Die Idee zu diesem Buch entstand während meines Aufenthalts am Wissenschaftskolleg in Berlin. Das Zusammentreffen mit Fellows aus der eigenen Zunft und ganz anderen Disziplinen wurde zu einer spannenden Zeit. Ich danke Beatriz Colomina und Mark Wigley, die mir Einsicht in ihr Denken über moderne Architektur und Design gaben. Ich danke dem Wissenschaftskolleg und vor allem der großartigen Unterstützung durch die WiKo-Bibliothek. Fertig gestellt habe ich dieses Buch nun mitten in der Corona-Pandemie. Ich fand die Zeit, Ideen und Erkenntnisse, Gespräche, Erlebnisse, Gedanken und Veröffentlichungen, die mich seit vielen Jahrzehnten antreiben und bewegen, zusammenzufassen.

Meine Kollegin Margaret McFall-Ngai und ein von ihr organisiertes Treffen am National Evolutionary Synthesis Center in Durham trugen entscheidend dazu bei, den größeren Zusammenhang zu sehen und die Spur dieses Buches zu verfolgen. Die alle zwei Jahre stattfindende Sommerschule am Gulbenkian Institute in Portugal und lange abendliche Gespräche mit den Studierenden und mit Margaret McFall Ngai, Ned Ruby, Martin Blaser, Gloria Domiguez Bello und Rob Knight waren immer anregend und machten Lust auf Weiterdenken.

Ich danke ferner Brett Finlay, Angela Douglas, Tobias Rees und Scott Gilbert für viele anregende Gespräche. Ein großer Dank geht an meine Kieler Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die langjährige Unterstützung. Ohne sie wäre dieses Buch niemals zustande gekommen.

Des Weiteren danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für eine immer verlässliche Finanzierung meiner Arbeiten. Der Sonderforschungsbereich 1182 „Ursprung und Funktionieren von Metaorganismen“ widmet sich dem Entstehen und Funktionieren von Metaorganismen und hat diese Arbeit maßgeblich unterstützt. Ich danke für die Unterstützung durch das Canadian Institute for Advanced Research (CIFAR), das mir als Fellow die Möglichkeit gibt, in einem höchst anregenden interdisziplinären Denkraum mit den Mitgliedern des Human and the Microbiome Program ungestört den komplexen Problemen auf den Grund gehen zu können.

Außerdem gilt mein Dank Christian Urban von der Pressestelle der Universität Kiel für seine Unterstützung beim Zustandekommen dieses Buches. Nicht zuletzt weiß ich das interessierte Entgegenkommen des Springer Verlags zu schätzen.

Mein besonderer Dank geht an Judith für das Rückenfreihalten und die andauernde Intensität und Tiefe unserer Gespräche, für die ich unendlich dankbar bin.



1962

*Es war einmal eine Stadt im Herzen Amerikas, in der alle Geschöpfe in Harmonie mit ihrer Umwelt zu leben schienen. [...] Dann tauchte überall in der Gegend eine seltsame schleichende Seuche auf, und unter ihrem Pesthauch begann sich alles zu verwandeln. Irgendein böser Zauberbann war über die Siedlung verhängt worden: Rätselhafte Krankheiten rafften die Kükenscharen dahin; Rinder und Schafe wurden siech und verendeten. Über allem lag der Schatten des Todes. [...] Es herrschte eine ungewöhnliche Stille. Wohin waren die Vögel verschwunden?*

Rachel Carson – *Der stumme Frühling*

2014

*Der Verlust der mikrobiellen Vielfalt auf und in unserem Körper fordert einen schrecklichen Preis. Ich sage voraus, dass es in Zukunft noch schlimmer sein wird. [...] Es ist so düster, wie ein Schneesturm, der über eine gefrorene Landschaft tobt, dass ich es „Antibiotika-Winter“ nenne. Ich möchte nicht, dass die Babys der Zukunft so enden wie meine armen Tanten. Aus diesem Grund schlage ich Alarm.*

Martin J. Blaser – *Antibiotika-Overkill: So entstehen die modernen Seuchen*

*Die Mikrobiomforschung verbindet die Erforschung wirklich komplexer und schwieriger grundlegender Fragen mit der Notwendigkeit, dringende Probleme der Biomedizin und der Umwelt zu lösen. Die Lösung dieser Probleme erfordert zwei konzeptionelle Neuausrichtungen: die Anerkennung der zentralen Bedeutung der Mikrobiologie von Tieren und die Erkenntnis, dass ihre Erforschung ein interdisziplinäres Unterfangen ist.*

Angela E. Douglas – *Fundamentals of Microbiome Science: How Microbes Shape Animal Biology*

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Grundsätzliches

- |          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Artenreicher Bakterienmix in unserem Körper</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Am Anfang war das Mikrobiom</b>   | <b>15</b> |
| <b>3</b> | <b>Von Lebensgemeinschaften zum Metaorganismus</b>   | <b>33</b> |
| <b>4</b> | <b>Wir verstehen die molekulare Architektur des Lebens – aber scheitern bei komplexen Erkrankungen. Wie geht das zusammen? Ist das Mikrobiom der blinde Fleck der Medizin?</b> | <b>41</b> |

**Teil II Was wir gerade lernen**

<b>5</b>	<b>Die Entdeckung der heilsamen Wirkung von Stuhl – Fäkale Mikrobiota-Transplantation (FMT)</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Kurze Zwischenfrage: Was ist eigentlich ein gesundes Mikrobiom?</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Ein funktionierendes Immunsystem hängt vom Mikrobiom ab</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Dick oder dünn? Übergewicht und Mikroben. Klassische Experimente, keimfrei gezogene Tiere und offene Fragen</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>Alt oder jung? Das Mikrobiom ändert sich im Laufe des Lebens</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>Noch vor dem ersten Schrei: Die Geburt als unser erster Kontakt mit dem Mikrobiom</b>	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>Mikroben und Krebs</b>	<b>91</b>
<b>12</b>	<b>Die Darm-Mikroben-Gehirn-Achse – Mikroben beeinflussen unser Verhalten</b>	<b>105</b>
<b>13</b>	<b>Die rätselhafte Verschlechterung unserer Gesundheit – das Mikrobiom in Zeiten sich ändernder Umweltbedingungen</b>	<b>119</b>

<b>Teil III</b>	<b>Fragen, die vor uns stehen; und Antworten, die es sich lohnt zu suchen, damit auch komplexe Lebensprozesse erklärbar werden</b>	
14	Ernährung zur Förderung eines vielseitigen Mikrobioms?	139
15	Kann das Mikrobiom Ansatzpunkt für innovative Therapien sein?	155
16	Wie übertragbar sind nichtübertragbare Krankheiten?	169
17	Was, wenn die Begegnungen und der Austausch ausbleiben? – Überlegungen während der Corona-Krise	175
18	Darwins blinder Fleck: Können Mikroben unsere Gene und unser Erscheinungsbild nachhaltig beeinflussen?	181
19	Sollten wir Mikroben für die Nachwelt in einer Art Arche Noah speichern?	187
20	Was brennt den Mikrobiomforschern sonst noch auf den Nägeln? – Blick in die aktuelle Mikrobiomforschung	195
21	Kennst du dich selbst? Kann die Forschung zum Mikrobiom unser Menschenbild verändern?	207

<b>22</b>	<b>Ausblick: Von unentbehrlichen Mikroben und dem Triumph des Metaorganismus</b>	213
	<b>Glossar – Begriffe, über die Sie beim Lesen nicht stolpern sollten</b>	223
	<b>Hier kann man noch weiterlesen (Literatur)</b>	227

# Teil I

## Grundsätzliches





# 1

## Artenreicher Bakterienmix in unserem Körper

Um was geht es mir in diesem Buch? 60 % der Biomasse auf der Erde bestehen aus Mikroorganismen. Das ist mehr als alle Menschen, Tiere und Pflanzen zusammengerechnet, vermutlich sogar mehr, als es Sterne im Universum gibt. In einem Tropfen Meerwasser befinden sich um die 100 Mio. Bakterien und 10 Mio. Viren. Jüngste Schätzungen der Artenzahl von Mikroben gehen von einigen Millionen Mikrobenarten aus. Dabei scheinen die freilebenden Mikroben nur einen eher kleineren Teil auszumachen. Die meisten Mikrobenarten leben als Symbionten. Zu diesen Symbionten gehören die Billionen von Mikroorganismen – Bakterien, Archaea, Pilze, Protozoen – und Viren (darunter auch Bakteriophagen), die unseren Körper bevölkern. Diese in ihrer Gesamtheit als Mikrobiom bezeichneten Keime stellen ein unglaublich komplexes System aus Tausenden mikrobieller Spezies dar, von denen sich die meisten derzeit noch kaum isoliert kultivieren lassen. Mikroben machen etwa 1,5–2 kg des