

Roland Sachs
Sigrun Mittl

Bienenbau & Bienenbeute



Die Bedeutung des
Kleinklimas für gesunde
Honigbienen

■ Haupt

Roland Sachs • Sigrun Mittl

Bienebau und Bienebeute

Roland Sachs • Sigrun Mittl

Bienenbau und Bienenbeute

Die Bedeutung des Kleinklimas für gesunde Honigbienen

Haupt Verlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Das große Ganze	
Das Zusammenspiel von Honigbienen, Mikroorganismen und Umwelt	11
1 «Behandelt die Bienen ihrer Natur gemäß, dann werden die Sorgen um ihre Krankheiten ganz von selber schwinden.»	11
2 Bakterien, Viren und Pilze sind tragende Säulen unseres Organismus	14
Ohne Bakterien, Viren und Pilze kein Leben auf der Erde und im Organismus	14
Der Organismus als Meta-Organismus mit Hologenom	14
3 Das Immunsystem als «Vermittler zwischen Wirt und Mikroben»	15
4 Die Rolle des Mikrobioms im und auf dem Lebewesen und sein Einfluss auf Entwicklung, Verhalten, Gesundheit und Krankheit	16
Wie die Honigbienen ihr Mikrobiom zusammenstellen	16
Der Einfluss des Mikrobioms auf Entwicklung und Verhalten von Organismen	17
Die Bedeutung der symbiotischen Mikrobengemeinschaft für Gesundheit und Krankheit	19
Mikrobiom und Gesundheit natürlich lebender und gezüchteter Tiere	21
5 Der Einfluss von Umweltfaktoren auf den Organismus und sein Mikrobiom	23
Das Zusammenspiel von Lebewesen, Mikroorganismen und Umwelt im Rahmen der Evolution	23
Welche Umweltfaktoren nehmen Einfluss auf den Organismus samt seiner Mikrobengemeinschaft?	24
6 Der Einfluss der Umweltfaktoren «Temperatur», «Luftfeuchte» und «CO₂» auf den Organismus und sein Mikrobiom und deren Gesundheit und Krankheit	25
Temperatur, Luftfeuchte und CO ₂ kontrollieren die Aktivierung von Genen mit: Der Einfluss der Epigenetik	25
Auswirkung von Temperatur, Luftfeuchte und Kohlendioxid auf Entwicklung, Verhalten und Krankheiten	26
7 Das Zusammenspiel von Honigbienen, Mikrobiom und Umweltfaktoren und seine Auswirkung auf Entwicklung, Verhalten, Gesundheit und Krankheit	29
8 Ein ganzheitlicher Blick auf Gesundheit und Krankheit der Honigbienen	31
Keim oder Milieu – die Streitfrage	31
Das gesunde Gleichgewicht zwischen Wirt, Parasit und Milieu	32
Es gibt keine Schädlinge – nur Organismen, die ein Ungleichgewicht anzeigen	33
Obligat und fakultativ pathogene Keime und die infektiöse Faktorenkrankheit	34
Eine neue alte Definition von Krankheit	35
Heilung wird nur möglich durch einen anderen Blick auf Krankheit	35

Einleitung: Die Wissenschaft vom Bienenbau	37
Teil I DIE WÄRMETRANSPORTE	43
1 Regionales Klima und örtliche Gegebenheiten der Bienenwohnung	45
2 Übertragungswege von Wärme	47
Wärmeleitung	47
Wärmeströmung	48
Wärmestrahlung	49
3 Wärmetransporte im Bienenstock	50
4 Hitzeschutz von Bienenwohnungen	52
Tagesgang der Temperatur	52
Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung	53
Auswirkung unterschiedlicher Wandaufbauten und Materialien	54
Hitzeschutz von Baumhöhlen in der Praxis	60
Der gemeinsame Nenner Hitzeschutz	62
5 Der Wärmeschutz von Bienenwohnungen	62
Der Wärmeschutz und der Unterschied zum Hitzeschutz	62
Die Wärmedämmung und ihre Wirkung als Wärmeschutz	63
Die Schichten des Wärmeschutzes der Bientraube und grundsätzliche Überlegungen für ihre Berechnung	63
Der Wabenbau als Winterpelz der Honigbienen	65
Konstruktive Maßnahmen der Bienen zum Wärmeschutz	71
Der Wärmeschutz der Bienenwohnung selbst	74
Arbeitswärme im Bienenstock	78
Wärmestau durch Wärmeschutz und die betriebsbedingte Verdunstungskälte	79
Die Komfortzone der Bienenwohnung – Eine Hypothese und ihre Einschränkung	80
6 Zusätzliche Einflüsse auf die Temperaturverhältnisse in der Bienenwohnung	83
Luftwechsel am Flugloch	83
Zusätzliche Belüftungen	84
Störungen des Bienenvolks	84
Die Geometrie der Bienenwohnung	85
Kühleffekte in der natürlichen Bienenwohnung	86
7 Thermografie im Bienenbau	86
Teil 2 DIE GASTRANSPORTE (WASSERDAMPF UND KOHLENDIOXID)	91
8 Die Feuchtigkeitsverhältnisse in Bienenwohnungen	93
9 Wasser und Wasserdampf	94
Sättigung und Dampfhunger der Luft	96
10 Wasserdampftransporte im Allgemeinen	100
Diffusion	100
Turbulenz und Strömung	101
Wechselwirkung zwischen Stoff- und Luftfeuchte	102
Wasserabgabe von Lebewesen durch Verdunstung	104
11 Nasse und trockene Baumhöhlen	104

12 Der Wasserdampfgehalt in unbesetzten Beuten und Baumhöhlen	107
13 Der Wasserdampfgehalt in einer mit Bienen besetzten Bienenwohnung	109
Die Quellen des Wasserdampfes in der Stockluft der Bienenwohnung	109
Zwischenspeicher für Wasserdampf in der Bienenwohnung	115
Kondenswasseranfall	123
Die Gastransporte im besetzten Bienenstock	130
Wasserdampfdruck und relative Luftfeuchte im Bienensitz	134
Massenaustausch am Flugloch	148
Wasserdampftransporte durch die Außenwände der Bienenwohnung	151
Belüftung und Stockfeuchte im Winter	154
14 Der CO₂-Gehalt im Bienenstock	155
Messreihe des CO ₂ -Gehalts in einer Erdbeute	157
Auswirkungen des CO ₂ -Gehalts auf die Bienengesundheit	159
Teil 3 DER EINFLUSS DER HONIGBIENEN AUF DAS KLEINKLIMA IM BIENENSTOCK	163
15 Die aktive Regulation des Kleinklimas durch die Honigbienen	165
Temperaturregulation	170
Luftfeuchtereulation	174
Der Sonderfall des an der Weiselzelle anliegenden Mikroklimas	180
Teil 4 BEDEUTUNG DER WÄRMEDÄMMUNG	181
16 Bedeutung von Hitze- und Wärmeschutz für die Honigbienen	183
Belege aus der Literatur für positive Auswirkungen einer Wärmedämmung	184
Krankheitsbilder und Schäden durch mangelhaften Hitze- und/oder Wärmeschutz	188
Teil 5 VOM BIENENBAU ZUM BEUTENBAU	205
17 Der Beutenbau	207
Beispiele für Bienenwohnungen und ihren Hitze- und Wärmeschutz	208
Die Bemessung des Hitze- und Wärmeschutzes	211
Schallschutz von Bienenwohnungen	219
Volumen und Geometrie des Brutraums	219
Standort und Ausrichtung der Bienenbeuten	222
Das Flugloch	222
Warm- oder Kaltbau	225
Rähmchen, Oberträger oder Naturwabenbau	225
Trennschiede, Einengen von Völkern	226
Zum guten Schluss	227
Gedanken zum Schluss	229
Die Autoren	230
Verweise	231
Register	242

Vorwort

Wenn Sie dieses Buch in Händen halten, dann wahrscheinlich aus genau dem gleichen Grund, aus dem wir es geschrieben haben! Ein Unbehagen, das uns plagt und eine bislang ungestillte Wissbegier, die uns treibt angesichts der vielen ungelösten Fragen rund um das Thema «Wie soll die Bienenwohnung gestaltet sein?»: Gedämmt oder ungedämmt, Boden offen oder geschlossen, diffusionsoffene Bauweise oder nicht, Leerzarge im Winter oder eingengt, Flugloch oben oder unten – Fragen über Fragen. Heizen die Honigbienen den leeren Raum mit oder nicht, steigt die Wärme nach oben oder nicht, sinkt das CO₂ nach unten oder nicht, ist die Schimmelbildung im Winter normal oder egal – es ranken sich viele Mythen um diese Fragen, aber es finden sich nur wenige verlässliche Fakten.

Vielleicht haben Sie genau wie wir Nächte über Nächte in Internet-Foren nach Antworten auf Ihre Fragen gesucht. Mit rauchendem Kopf nach stundenlangem Lesen waren Sie genauso schlau wie zuvor und frustriert und verwirrt zurückgeblieben angesichts der sich oft widersprechenden Meinungen, vorgeblichen Fakten, Ratschlägen und Erklärungen. Das Ergebnis lautete dann oft: Dann lass ich es wie es ist und gut ist! Dass es sich dabei um einen Trugschluss handelt, spüren wie Sie jedoch viele. Wenn wir uns vergegenwärtigen, dass unsere Westliche Honigbiene *Apis mellifera* zur Untergattung der Höhlenbrütenden Honigbienen gehört und zumeist in Baumhöhlen lebt, die keine sperrangelweiten offenen Böden oder 2 cm dünne Wände aufweisen, dann können wir unschwer daraus ableiten, dass unsere ungedämmten Bretterbeuten nicht bienengemäß sein können.

Völlig ernüchtert ob der unbefriedigenden Lösungsvorschläge beschloss ich, Sigrun Mittl, mich solange in meine alte Universitätsbibliothek in Erlangen zu setzen, bis ich Fakten zum Kleinklima in Bienenwohnungen aus den Tiefen verstaubter Keller zutage befördern würde. Ich war davon überzeugt, dass es darüber Wissen geben musste, oder vielleicht hatte ich auch nur eine Ahnung. Ich arbeitete Stapel über Stapel von vor mir aufgetürmten Büchern durch, über Monate – bis ich endlich auf den Schatz stieß, den ich gesucht hatte. Ich war glücklich, aufgeregt, aber dann vor allem fassungslos ob der wissenschaftlichen Erkenntnisse, die seit 1946 dem Imker in den Imkerzeitschriften angeboten wurden, aber heute nicht mehr bekannt sind – es war doch alles da! Warum weiß davon niemand? Warum wird das nicht gelehrt? Warum gibt es darüber keine Imkerbücher? Die nächsten Monate verbrachte ich damit, alle Imkerzeitschriften, die es nur gab, durchzuarbeiten und alle Artikel über Bienenphysik und fachverwandte Themen he-

rauszukopieren. Und mir wurde klar: Darüber würde ich irgendwann ein Buch schreiben und alle wesentlichen Fragen rund um die bienengemäße Bienenwohnung endlich wissenschaftlich fundiert erklären.

Bienenphysik – so nannte der studierte Meteorologe Dr. Anton Büdel sein Wissenschaftsfeld; 1946 gründete er in München die «Versuchsstelle für Bienenphysik», die er 20 Jahre lang leitete, unterstützt von seinem Kollegen Josef Grziwa. Dort erforschten sie das Kleinklima im Bienenstock und gingen den Fragen nach Wärme- und Feuchte-transporten in der Bienenwohnung nach, auf höchstem wissenschaftlichem Niveau: Die Messungen erfolgten mit bis zu 100 Messstellen innerhalb einer Beute. Sie führten viele Tausende von Messungen bei Tag und bei Nacht durch, um auf die Fragen der Imkerschaft nach der richtigen Beute und den richtigen Imkertechniken genaueste Antworten geben zu können. Dr. Büdel veröffentlichte seine Ergebnisse in über 260 Artikeln in den wichtigsten Imkerzeitschriften und hielt etwa ebenso viele Vorträge im In- und Ausland. Er warb unermüdlich dafür, die technisch gewordene Imkerpraxis nicht über die biologischen Bedürfnisse der Honigbienen zu stellen. Als er 1964 seine Versuchsstelle schloss, war kein Nachfolger gefunden, der die Forschungsarbeit fortsetzte, wie eine Bienenzeitschrift bedauernd feststellte.

In den nächsten 2 Jahren arbeitete ich mich tief in diese Materie ein und sammelte neben weiteren älteren Veröffentlichungen zu den Themenkreisen «Wärmehaushalt» und «Stoffwechsel» der Honigbienen noch alle aktuellen wissenschaftlichen Studien, die es dazu gab. Für mich war klar, dass Wärmeschutz, Hitzeschutz, Temperatur, Luftfeuchte und Kohlendioxid im Bienenstock entscheidende Faktoren für die Gesundheit der Honigbienen darstellten. Es war mir aber auch klar, dass ich ein Fachbuch wie dieses niemals allein würde schreiben können.

Und so bat ich im Geiste die Honigbienen, sie mögen mir einen Bauphysiker schicken, der genauso fasziniert von ihnen und ebenso fakten- und detailverliebt wäre wie ich. Es mag unglaublich klingen, aber ein paar Monate später fanden Roland Sachs und ich zusammen. Das war 2018. 2020 fragte ich ihn dann, ob er sich vorstellen könne, mit mir zusammen ein Buch über das Kleinklima im Bienenstock zu schreiben und er sagte zu! So nahm die Geschichte des Buches ihren Anfang.

Wenn Sie mein Buch «Nachhaltig imkern mit gesunden Honigbienen» gelesen haben, wissen Sie, dass die Gesundheit der Honigbienen nicht durch bestimmte Erreger gefährdet ist, die Krankheiten auslösen können, sondern

vor allem durch Imkerpraktiken und Haltungsbedingungen. Honigbienen lebten in Baum-, Fels- oder Erdhöhlen, ernährten sich von Nektar und Pollen aus reichhaltigstem Blütenangebot, wohnten weit genug von ihren Artgenossen entfernt und wurden außer von Bären, Vögeln und Mardern von niemandem gestört. Sie lebten in natürlichen Höhlen, die ganz bestimmte Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse sowie bestimmte CO₂-Konzentrationen aufwiesen. In und auf den Honigbienen lebten und leben die verschiedensten Mikroorganismen, ohne die sie nicht überleben können. Wer sind diese Mikroorganismen, die die Wissenschaft als «Mikrobiom» bezeichnet und welche Rolle spielen sie im Rahmen von Entwicklung, Verhalten und Ausbildung von Krankheiten? Es war mir ein tiefes Anliegen, in diesem Buch noch einen Sonderteil zu schreiben, der das Zusammenspiel von Honigbienen, Mikroorganismen und Umwelt beleuchtet und Ihnen neue Einblicke in die Entstehung von Krankheiten bietet, oder besser gesagt, einen ganzheitlichen Blick auf Gesundheit und Krankheit der Honigbienen wirft. Sie können diesen farblich vom Hauptteil des Buches abgehobenen Sonderteil «Das große Ganze» als Erstes lesen oder auch später.

In unserem Buch «Bienenbau & Bienenbeute» widmen wir uns einem Umweltfaktor, der zentral auf die Honigbienen einwirkt, nämlich ihrer Bienenwohnung. Ist sie nicht die Voraussetzung für ein naturgemäßes Leben der Honigbienen? Wurde ihre Bedeutung vielleicht unterschätzt? Sind deshalb alle Bemühungen um die Gesundung der Honigbienen wenig erfolgreich? Da wir der Überzeugung sind, dass das so ist, möchten wir uns in diesem Buch ausführlich einem Bereich widmen, der unserer Ansicht nach bis heute sehr stiefmütterlich behandelt wird, nämlich der Bedeutung der Bienenwohnung samt ihren kleinklimatischen Bedingungen für die Gesundheit unserer Honigbienen. Die Westliche Honigbiene gehört zur Untergattung der «Höhlenbewohnenden Honigbienen» und hat sich somit über Millionen von Jahre an die Bedingungen in diesen Höhlen angepasst. Welcher Natur sind solche Höhlen, kann man sich fragen? Welche kleinklimatischen Bedingungen herrschen in solchen Höhlen und welche ausgefeilten Methoden haben die Honigbienen vielleicht erlernt, um dieses Kleinklima für sich und die Erhaltung ihrer Art zu nutzen oder vielleicht sogar an ihre Bedürfnisse anzupassen?

Eines ist klar: In diesen natürlichen Höhlen herrschten Bedingungen, an die sich die Honigbienen im Zuge der Evolution perfekt angepasst haben und die es ihnen ermöglichten, bis auf den heutigen Tag gesund zu überleben und ihre Art zu erhalten. Wir möchten daher ganz gezielt die Frage aufwerfen und beantworten, ob die kleinklima-

tischen Bedingungen in diesen Höhlen einen Einfluss auf Gesundheit und Krankheit der Honigbienen haben und ob die Bienenwohnungen, die wir Imkerinnen und Imker heute verwenden, diesen notwendigen Bedingungen gerecht werden.

Viele Studien weisen heute darauf hin, dass Umweltfaktoren, die auf die Lebewesen einwirken, sehr großen Einfluss auf Gesundheit und Krankheit nehmen, indem sie unter anderem deren Immunsystem entweder stärken oder schwächen. In unserem konkreten Fall möchten wir anhand von wissenschaftlichen Studien zeigen, dass der Einfluss eines ausgefeilten Hitze- und Wärmeschutzes, durch den sich die von der Natur bereitgestellten Bienenwohnungen auszeichnen, sowie der Einfluss der Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse einschließlich des CO₂-Gehaltes in den Bienenwohnungen nachweisbare Auswirkungen auf die Entwicklung der Brut, das Verhalten der erwachsenen Honigbienen und den Ausbruch von Krankheiten haben, und dafür werben, bienengemäße Bienenbeuten in Einsatz zu bringen.

Nach 3 Jahren intensiver Arbeit können wir aus tiefer Überzeugung sagen, dass die Honigbienen die beiden Richtigen zusammengeführt haben: Eine Diplom-Biologin und einen Diplom-Bauingenieur, die beide für die Honigbienen, die Bienenphysik und die Wissenschaft überhaupt brennen. Wir hatten und haben eine unglaubliche Freude an dieser Arbeit und haben unser Bestes gegeben, so viele Fragen wie möglich rund um die bienengemäße Bienenbeute fundiert zu beantworten. Jetzt übergeben wir unser Buch «Bienenbau & Bienenbeute» an Sie, liebe Imkerin und lieber Imker, und hoffen, dass Sie viele neue Erkenntnisse gewinnen und viel Freude mit diesem Buch haben mögen – zum Wohle unserer Honigbienen.

Wir widmen unser Buch hiermit Dr. Anton Büdel, ohne dessen präzise und fundierte wissenschaftliche Forschung es niemals geschrieben worden wäre. Auf seiner Arbeit baut «Bienenbau & Bienenbeute» auf, aus seinen Quellen schöpfte es.

Januar 2024

Sigrun Mittl & Roland Sachs

Das große Ganze

Das Zusammenspiel von Honigbienen, Mikroorganismen und Umwelt

Sigrun Mittl

1 «Behandelt die Bienen ihrer Natur gemäß, dann werden die Sorgen um ihre Krankheiten ganz von selber schwinden.»⁽¹⁾

Die Aussage von Dr. Steche (Landesanstalt für Bienenkunde Hohenheim) aus dem Jahr 1961 wird uns Imkerinnen und Imker doch sehr überraschen, da wir in der Imkerpraxis davon ausgehen, dass für den Ausbruch einer Erkrankung ein bestimmter Erreger verantwortlich ist. Für die Bekämpfung der Erreger stehen dann verschiedenste

Behandlungsmittel zur Verfügung, die mit dem Ziel angewandt werden, die Krankheit zu besiegen. Diese Strategie habe ich in meinem Buch «Nachhaltig imkern mit gesunden Honigbienen» als «Ausrottung des Feindes» bezeichnet. Anhand der vier bekanntesten Erreger, der Tracheenmilbe (*Acarapis woodi*), des Erregers der Amerikanischen Faulbrut (*Paenibacillus larvae*), der Nosema-Pilze (*Nosema apis*; *Nosema ceranae*) und der Varroa-Milbe (*Varroa destructor*) habe ich nachgewiesen, dass diese Strategie nicht zum erwünschten Erfolg geführt hat, d. h., die Gesundung der Honigbienen zu erreichen.⁽²⁾



■ **Abb. 1:** Gesunde Honigbienen benötigen hochwertige Nahrung aus einem vielfältigen Blütenangebot. Sie versorgen sich dort auch mit den im Nektar und in den Pollen jeweils vorhandenen Mikroorganismen und gliedern sie ihrem eigenen Mikrobiom ein.

Als zweite Ursache für eine Erkrankung wird häufig die genetische Ausstattung eines Organismus angesehen. Trotz aufwendiger Forschung konnte man allerdings bis heute nicht nachweisen, dass die Anwesenheit eines bestimmten Gens direkt für den Ausbruch einer Krankheit verantwortlich ist.⁽³⁾ «Als Bestandteile eines größeren Ganzen wirken sie [die Gene] an der Entwicklung von Organismen und ihrem Verhalten mit,»⁽⁴⁾ sind aber keine Programme oder Anweisungen für den Aufbau des Organismus oder die Auslösung einer Krankheit; die DNA-Moleküle sind nur Moleküle und «geben einfach nur die Abfolge der Aminosäuren in Eiweißmolekülen vor.»⁽⁴⁾ Natürlich prägen die Gene den Organismus entscheidend mit. Sie bilden aber nur einen Baustein im Gesamtgefüge des Organismus und seiner Fähigkeit, seine Art zu erhalten. Welche Gene wann abgelesen werden, um die verschiedensten Zellstrukturen oder Organe aufzubauen oder Krankheiten auszulösen, wird gemäß der Forschungen der letzten Jahrzehnte wahrscheinlich auf verschiedenen übergeordneten Ebenen gesteuert: zum einen durch bioelektrische Gradienten, die im flüssigen Milieu innerhalb der Zellen und dem der Zellzwischenräume herrschen⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾ und diesen Gradienten übergeordnete morphogenetische Felder.⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ Zum anderen aber auch durch die verschiedensten Umweltfaktoren wie – um nur vier zu nennen – Temperatur, Luftfeuchte, Kohlendioxid innerhalb des Bienenstocks oder Haltungsbedingungen.

Was also führt zu einer Erkrankung? Die Forschung der letzten 100 Jahre hat den Blick auf andere Zusammenhänge gerichtet, die sich aus bestimmten Beobachtungen in Honigbienenvölkern ergeben haben: In dem einen Volk lässt sich ein bestimmter Erreger zwar nachweisen, seine Anwesenheit führt aber nicht zum Ausbruch von klinischen Symptomen, das Volk ist gesund und munter. In einem anderen Volk löst der gleiche Erreger mit der gleich hohen Sporenlast eine schwere Erkrankung aus. Daraus haben die Forscher geschlossen, dass alleine die Anwesenheit eines Erregers nicht die Ursache für eine Erkrankung sein kann. Es müssen andere Faktoren ebenfalls eine Rolle spielen: Ändern sich diese, kann eine Erkrankung ausbrechen. Der sehr renommierte Bienenforscher Prof. Borchert hat dies für die Nosema-Seuche 1930 so formuliert:

«Dem Parasiten kommt niemals eine primäre, sondern immer nur eine sekundäre Bedeutung zu. Als primäre Ursache für das Zustandekommen der Nosemaseuche ist vielmehr eine Verschlechterung der Dis-

position des Volkes anzusehen, eine Verschlechterung seiner gesamten biologischen und physiologischen Verhältnisse.»⁽¹¹⁾

Die Forschung hat verschiedene Wirkfaktoren ausfindig machen können, die diese Disposition beeinflussen. Zum einen sind dies die Vitalität der Organismen und ihre genetische Ausstattung. Zum Zweiten die Gemeinschaft der Kleinstlebewesen, die in und auf diesen Organismen leben, das sogenannte «Mikrobiom». Dieses Mikrobiom erfüllt unter anderem eine wichtige Funktion im Rahmen des Immunsystems, welches für die Aufrechterhaltung der Gesundheit wesentlich ist. Es spielt aber auch eine wichtige Rolle bei der Entwicklung und dem Verhalten der Lebewesen. Und zum Dritten die innere und äußere Umwelt, in der die Honigbiene und ihr Mikrobiom leben. Als innere Umwelt gilt das Milieu im Inneren des Lebewesens, also physiologische Verhältnisse und Eigenschaften der Körper- und Zellflüssigkeiten, die unter anderem durch den Säuren/Basen-Gehalt, die Anwesenheit von bestimmten Salzen und Nährstoffen sowie die chemischen und elektrischen Gradienten bestimmt werden. Als äußere Umwelt werden unter anderem Land- und Forstwirtschaft, der Artenreichtum sowie das Mikrobiom der Landschaft, der mikrobielle Zustand der Böden und im Fall der Nutztierhaltung der Honigbienen die Haltungsbedingungen, die Imkerpraxis und die Bienenwohnungen (Bienenbau) samt dem darin herrschenden Kleinklima (Temperatur, Luftfeuchte, Kohlendioxidgehalt) definiert. Diese äußeren Umweltfaktoren, die auf die Honigbienen und ihr Mikrobiom einwirken, nehmen sehr großen Einfluss auf Gesundheit und Krankheit. In unserem Buch «Bienenbau & Bienenbeute» konzentrieren wir uns auf den Umweltfaktor «Bienenbau». Die Umweltfaktoren «Haltungsbedingungen» und «Imkerpraxis» streifen wir nur, da sie in meinem Buch «Nachhaltig imkern mit gesunden Honigbienen»⁽²⁾ ausführlich besprochen werden.

Die Aufrechterhaltung der Gesundheit hängt also vom Zusammenspiel von Honigbienen, Mikroorganismen und Umwelt ab. Wenn dieses Zusammenspiel aufgrund von bienengemäßen Bedingungen harmonisch ist, bleibt die Population der Honigbienen gesund und das über Millionen von Jahre, wie die Westliche Honigbiene (*Apis mellifera*) beeindruckend bewiesen hat. Erreger, die es schon immer gab, werden auf diese Weise in Schach gehalten und stellen kein Problem dar; mehr noch, in vielen Fällen sind sie Teil des Mikrobioms der Landschaft und der Honigbiene selbst.



■ **Abb. 2:** Jenseits aller Debatten dürfte eines klar sein: Je struktur- und artenreicher eine Landschaft ist, desto gesünder können alle Lebewesen in ihr leben.

Die Strategie, einen Erreger bekämpfen und ausrotten zu wollen, greift zu kurz, wenn wir die Heilung einer Krankheit bewirken möchten. Es genügt auch wegen des oben skizzierten komplexen Zusammenspiels nicht, sich auf nur einen Faktor zu konzentrieren, um die Gesundheit der Honigbienen wiederherzustellen und zu erhalten. Der Bienenbau ist «nur» ein Baustein der bienengemäßen Haltung, wenn auch ein wesentlicher. Imkerpraxis und Haltungsbedingungen sind ebenso wichtig. Ermutigend jedoch ist eine weltweit gemachte und wissenschaftlich abgesicherte Beobachtung: Wild lebende Honigbienen können gesund und krankheitsresistent werden und bleiben, auch in nicht wirklich naturnahen Landschaften.⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ Daraus können wir trotz allem die hohe Bedeutung der drei Umweltfaktoren «Bienenbau», «Imkerpraxis» und «Haltungsbedingungen» ableiten, die wir in der Hand haben und so bienengemäß wie möglich gestalten können. Es lohnt also, sie in ihren jeweiligen Dimensionen in Bezug auf Gesundheit und Krankheit zu verstehen und umzusetzen.

Nach Bruder Adam muss die Bienenzucht das Ziel verfolgen, das Immunsystem der Honigbienen so zu stärken, dass sie mit allen Krankheiten selbst zurechtkommen.⁽¹⁸⁾

Dies kann gelingen, wenn wir die Honigbienen ihrer Natur gemäß behandeln. Wenn die Aussage von Dr. Steche stimmt, können wir als Imkerinnen und Imker sehr viel dafür tun, unsere Honigbienen am Imkerstand gesund werden zu lassen und gesund zu erhalten. Das Verständnis für die Zusammenhänge von Honigbienen, Mikroorganismen und Umwelt bildet die Grundlage dafür. Es kann uns darlegen, an welchen Stellschrauben wir erfolgreich drehen können, zeigt uns aber auch, welche Strategien keinen Erfolg haben und warum nicht. Lassen Sie uns also in medias res gehen.

Ich möchte mit Ihnen zusammen einen völlig neuen Blick auf sogenannte Erreger und Keime, auf die Funktion des Immunsystems und auf die Einflüsse der Umwelt, zu der auch wir Imkerinnen und Imker gehören, werfen und scheinbar gesicherte Annahmen hinterfragen. Beginnen möchte ich damit, wie sich das Mikrobiom herausgebildet hat und warum es so wesentlich für die Aufrechterhaltung der Gesundheit der Honigbienen ist. Dazu müssen wir weit in die Geschichte zurück.

2 Bakterien, Viren und Pilze sind tragende Säulen unseres Organismus

OHNE BAKTERIEN, VIREN UND PILZE KEIN LEBEN AUF DER ERDE UND IM ORGANISMUS

Die Erde war vor 4,5 Milliarden Jahren als fester Gesteinskörper mit Atmosphäre und Ozeanen entstanden. Nach nur 1,1 Milliarden Jahren entstanden wahrscheinlich die ersten Bakterien, wie Fossilienfunde vermuten lassen. Ob Viren schon vor den Bakterien da waren oder aus ihnen entstanden sind, wird noch diskutiert. In den darauffolgenden mehr als 2 Milliarden Jahren finden sich nur Einzeller und Viren auf der Erde, bevor sich aus diesen Organismen alle weiteren Lebewesen der Erde entwickelten.⁽¹⁹⁾ Die Rolle der Viren wurde lange unterschätzt; statt als Krankheitskeime, als die sie nach wie vor gerne bezeichnet werden, wird ihnen in der neuesten Forschung die Rolle der Treiber der Evolution zugeschrieben: «Viren verbreiten heute Gene unter Bakterien oder menschlichen oder anderen Zellen, wie sie es immer getan haben. Wie die symbiontisch lebenden Bakterien, so sind auch die Viren eine Quelle der entwicklungsgeschichtlichen Vielfalt.»⁽¹⁹⁾ Sie transportieren wie auch die Bakterien Genabschnitte in rasender Geschwindigkeit zu anderen Organismen und spielen daher eine unverzichtbare Rolle in der Evolution und der Anpassung aller Arten an veränderte Umweltbedingungen.⁽²⁰⁾⁽²¹⁾⁽²²⁾

DER ORGANISMUS ALS META-ORGANISMUS MIT HOLOGENOM

Die Zusammenarbeit aller Bakterien, Viren, Pilze und sonstigen Mikroorganismen hat alle Lebewesen erst hervorgebracht und damit natürlich auch die Honigbiene. Die Genomforschung hat festgestellt, dass der Mensch mehr Bakterien und Viren aufweist als körpereigene Zellen. Wahrscheinlich gilt das für die Mehrzahl der Organismen. Wir sind nicht allein in unserem Körper, sondern beherbergen eine Vielzahl von verschiedensten Mikroorganismen, die wir in ihrer Gesamtheit als Mikrobiom bezeichnen, ohne die wir gar nicht leben könnten. Aus diesem Grund versteht die Forschung die Organismen nicht mehr als individuelle Einheiten, sondern als eine «Wohngemeinschaft» von vielen Organismen. Der Fachbegriff dafür ist «Holobiont» oder «Meta-Organismus». Und die genetische



■ **Abb. 3:** Sammlerin bei der Arbeit. Ein observiertes Versuchsvolk in den USA tätigte 95 % der Sammelflüge innerhalb von 6 km Entfernung, im Schnitt flogen die Sammlerinnen 1,7 km weit.⁽²³⁾

Ausstattung des Organismus, also dessen Genom, plus die seines Mikrobioms wird zusammengenommen als «Hologenom» bezeichnet.⁽²⁴⁾

«Mikroben haben damit wahrscheinlich jede Entwicklungsphase des Lebens vom einfachen Einzeller bis zum Wirbeltier und Mensch maßgeblich begleitet. Wenn wir unsere genetische Ausstattung, das Genom, als ein Teleskop in die Vergangenheit des Menschen benutzen, stellen wir zu unserer großen Überraschung fest, daß etwa 37 % der Gene in unserem eigenen Genom sich auf unsere bakterielle Vergangenheit zurückführen lassen.»⁽²⁵⁾

Das bedeutet, dass sich auch 37 % der Honigbienen-Gene auf ihre bakterielle Vergangenheit zurückführen lassen.

Holobiont: Alle tierischen und pflanzlichen Organismen bilden mit sie kolonisierenden Bakterien, Pilzen und Viren eine Einheit, einen sogenannten ‚Holobiont‘. Der Begriff setzt sich aus den griechischen Wortstämmen ‚holos‘ (= ganz) und ‚bios‘ (= Leben) zusammen und bezeichnet damit etwas unscharf eine Art Lebensgemeinschaft.

«Meta-Organismus: Ein Zusammenschluss aus einem pflanzlichen oder tierischen Wirtsorganismus und der synergetischen Interaktion mit Bakterien, Archaeen, Pilzen, Viren sowie auch zahlreichen eukaryotischen Arten wie den symbiontischen Algen der Korallen.»⁽²⁵⁾

Mikrobiom: Das Mikrobiom bezeichnet die Gesamtheit aller Mikroorganismen, die einen Organismus besiedeln. Diese Mikroorganismen setzen sich zum Großteil aus Bakterien, aber auch Pilzen, Viren und anderen Mikroben zusammen.

Hologenom: Die genetische Ausstattung des Organismus (= Genom) plus die des Mikrobioms wird zusammengefasst als Hologenom bezeichnet.⁽²⁴⁾

«Selbst in jedem Liter Meerwasser befinden sich eine Milliarde Bakterien und zehn Milliarden Viren. Die meisten von ihnen sind keine Krankheitskeime, sondern essentieller Teil der ‚lebenden Welt‘. Millionen von ihnen besiedeln das Gewebe von Pflanzen und von Tieren.»⁽²⁵⁾ Die Wissenschaftler, die sich damit beschäftigen, stellten zu ihrer Überraschung fest, dass es weder keimfreie Organismen noch keimfreie Organe gibt. «Wir sind ganz offensichtlich mit den Mikroben eine evolutionäre Partnerschaft eingegangen, die für unsere Stoffwechsel-, Entwicklungs- und Abwehrprozesse von entscheidender Bedeutung ist.»⁽²⁵⁾ Diese unglaubliche Vielfalt der Mikroben in allen Lebewesen ist der Grund dafür, dass sich Organismen innerhalb kürzester Zeit an veränderte Umweltbedingungen (= Milieu) anpassen können. Die Forschung zeigt, dass die Evolution nicht in erster Linie durch Mutation und Selektion vorangetrieben wird, sondern durch Veränderungen in der Mikroorganismen-Gemeinschaft, die ein Organismus beherbergt.⁽²⁶⁾

■ **Abb. 4:** Zu unterschiedlichen Tageszeiten werden unterschiedliche Blüten angeflogen, da diese sich jeweils zu unterschiedlichen Tageszeiten öffnen.

3 Das Immunsystem als «Vermittler zwischen Wirt und Mikroben»

Das Immunsystem wurde lange Zeit ausschließlich als Abwehrsystem gegen Erreger betrachtet. Die Ergebnisse der Forschung an einem Süßwasserpolyphen (*Hydra spec.*) haben allerdings eine Frage aufgeworfen, die das bisherige Bild der Aufgabe des Immunsystems vollkommen verändern sollte: Aus welchem Grund verfügt ein so einfach aufgebauter Organismus über «eine enorme Komplexität des angeborenen Immunsystems und ungemein vielfältige Abwehrwerkzeuge»⁽²⁵⁾ angesichts der Tatsache, dass es doch Millionen mal mehr lebenserhaltende Mikroben als Krankheitskeime gibt? Es scheint doch wenig sinnvoll, ausschließlich für ein paar Hundert Krankheitskeime, die es weltweit gibt, ein solch ausgeklügeltes Abwehrsystem ein Leben lang am Laufen zu halten.⁽²⁷⁾ Vertiefte Forschungen lieferten eine bahnbrechende Erkenntnis: Das Immunsystem erweist sich als ein uraltes System, welches in allererster Linie dazu dient, «die vielfältigen Lebensgemeinschaften und zwischenartlichen Interaktionen in diesem ‚Meta-Organismus‘ aufrechtzuerhalten.»⁽²⁵⁾ Dem körpereigenen Mikrobiom kommt damit eine entscheidende Bedeutung zu, die Gegenstand umfassender Forschung geworden ist.⁽²⁶⁾



4 Die Rolle des Mikrobioms im und auf dem Lebewesen und sein Einfluss auf Entwicklung, Verhalten, Gesundheit und Krankheit

WIE DIE HONIGBIENEN IHR MIKROBIOM ZUSAMMENSTELLEN

Honigbienen haben im Laufe ihrer Evolution gelernt, sich ihr Mikrobiom anhand der zur Verfügung stehenden einheimischen Flora und Fauna zusammenzustellen. Der Nektar sowie der Pollen jeder Pflanzenart weisen ein einzigartiges Mikrobiom auf, jedes Blatt wird von einem Mikrobenfilm überzogen, der die Pflanze vor Krankheiten schützen soll⁽²⁸⁾. Nektar und Pollen, die in den Bienenstock eingetragen werden, impfen sowohl den Bienenstock mit Mikroorganismen als auch die Honigbienen selbst, die sich davon ernähren. Wenn die Larven der Honigbienen aus den Eiern schlüpfen, sind sie keimfrei. Ihr typisches Mikrobiom erhalten sie durch die Aufnahme des Futter-

saftes, den ihnen die Ammenbienen reichen. Aber auch die Flüssigkeit, die aus Misthaufen austritt, scheint für die Honigbienen interessant zu sein. Imker beobachten immer wieder Honigbienen, die diese Flüssigkeit aufnehmen und vermuten, dass sie wichtige Nährstoffe enthält. Vielleicht enthalten sie aber auch bestimmte Mikroorganismen, die die Honigbienen ihrem Mikrobiom «einverleiben». Wir wissen, dass Sauerkraut mithilfe von Milchsäurebakterien vergoren, also fermentiert wird. Diese Milchsäurebakterien müssen nicht extra zugesetzt werden, da sie sowohl auf den Blättern des Kohls als auch in der Luft in rauen Mengen vorhanden sind. Solche Bakterien finden sich auch im Pansen von Wiederkäuern. Ich habe Honigbienen dabei beobachtet, wie sie Flüssigkeit aus einem unverschlossenen und dem Regen ausgesetzten Eimer aufnehmen, der vergorenes, zwei Wochen altes Gras enthielt. (Eigene Beobachtung, August 2023) Hierbei handelt es sich um den Panseninhalt eines Walachen-Schafes (alte Haustierrasse), das in Hütelhaltung sehr naturnah gehalten wird und daher sehr hochwertiges Futter (samt den darauf lebenden Mikroorganismen) frisst.



■ **Abb. 5:** Honigbienen versorgen sich über die Aufnahme von Flüssigkeit aus vergorenem Gras, das aus Schafpansen entnommen wurde, möglicherweise auch mit im Pansen enthaltenen Mikroorganismen.

Wir können vermuten, dass diese Schafe ein wesentlich artenreicheres Mikrobiom enthalten als Schafe, die mit Silage und Kraftfutter gefüttert werden und im Stall stehen. Alle Wiederkäuer verfügen über ein Hohlorgan, den Pansen, der als Gärkammer dient und das gefressene Gras aufnimmt. Die Pansenflora und -fauna, also das Mikrobiom des Pansens (vergleichbar dem Darmmikrobiom), spalten die Kohlenhydrate und Proteine auf und stellen auf diese Weise dem Organismus Energie, Proteine und Vitamine zur Verfügung. Auch die Milchsäurebakterien sind Teil dieser Flora. Es könnte sein, dass sich die Honigbienen über die Aufnahme der Flüssigkeit neben Nährstoffen und Vitaminen auch mit Mikroorganismen versorgen. Die Erforschung dieser Hypothese könnte in die eine mögliche Strategie münden, die Gesundheit der Honigbienen über die Gabe verschiedenster Nährstoffe und Probiotika zu steigern.

DER EINFLUSS DES MIKROBIOMS AUF ENTWICKLUNG UND VERHALTEN VON ORGANISMEN

Das beste Forschungsdesign zur Untersuchung der Aufgaben des Mikrobioms für den Wirt besteht darin, den Organismus auf künstliche Weise keimfrei zu machen, ihm also sein Mikrobiom vollständig zu entnehmen und die Entwicklung von Gesundheit und Verhalten in der Folge zu studieren. Was die Wissenschaft im Zuge dieser Forschung erlebt, stellt einen Paradigmenwechsel im Verständnis von Gesundheit und Krankheit dar:

«Ein Entfernen der Bakteriengemeinschaft, eine Reduktion der Vielfalt der Bakterien und auch jede Störung der Kommunikation zwischen dem Wirtsorganismus und den Bakterien wird für das rapide Ansteigen von einer Fülle von komplexen meist chronisch entzündlichen Erkrankungen verantwortlich gemacht.»⁽²⁵⁾

Eine von vielen Studien zeigt diese Zusammenhänge in eindrucksvoller Weise auf: Eine Gruppe keimfrei gemachter Mäuse wurde mit dem Mikrobiom von Wildmäusen besiedelt, eine zweite mit dem von Labormäusen; danach wurden beide Gruppen mit einem Virus infiziert. Aus der Gruppe mit dem Wildmikrobiom überlebten 92 %, aus der Gruppe mit dem Labormikrobiom lediglich 17%. Viele Wildmäuse waren zudem mit bekannten Krankheitserregern besiedelt, zeigten aber keine klinischen Symptome, was darauf hindeutet, dass das Mikrobiom von Wildmäu-

sen die Toleranz gegenüber bestimmten Krankheitserregern fördert. Das Mikrobiom der Wildmäuse wies auch eine wesentlich höhere Diversität (Artenvielfalt) auf als das von Labormäusen, und zwar sowohl hinsichtlich der Anzahl verschiedener Arten als auch der Anzahl Individuen.⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾ Es zeigt sich also: Das Mikrobiom von Wildtieren unterscheidet sich offensichtlich dramatisch von dem von in Gefangenschaft gehaltenen Tieren. Ich werde später in diesem Buch auf diesen Sachverhalt zurückkommen.

Aber auch das gesamte Verhalten eines Lebewesens hängt mit seinem gesunden Mikrobiom zusammen, wie Studien an Mäusen belegen: Das Verhalten keimfrei gemachter Mäuse ist vollständig verändert. Sie wurden ängstlich, putzten sich nicht mehr, ihre Gedächtnisleistung nahm rapide ab, die Bewegungsabläufe wurden chaotischer und das soziale Verhalten ging zum Teil vollständig verloren.⁽³¹⁾ Zudem sorgt das Mikrobiom für eine effiziente Nährstoffversorgung, kontrolliert die Krankheitserreger, löst Entwicklungsprogramme aus wie z. B. die Einleitung der Fortpflanzung und gestaltet das Immunsystem. «Geruch, Gesundheit, Verdauung, Entwicklung und Dutzende weiterer Eigenschaften, die wir dem ‚Individuum‘ zuschreiben, sind in Wahrheit das Ergebnis einer komplexen Interaktion zwischen Wirt und Mikrobiom.»⁽³²⁾

Schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts wurde auch am Mikrobiom der Insekten geforscht, die Ergebnisse aber z. T. bis heute in ihrer Tragweite unterschätzt oder gar ignoriert.

«Symbionten gibt es nicht nur beim Menschen und bei den Säugetieren, sondern auch bei anderen Tieren. Buchner und A. Koch haben in umfangreichen und sehr sorgfältigen Arbeiten nachgewiesen, dass die Insekten viele Symbionten-Arten besitzen und sie oft in ganz speziellen Einrichtungen (Mycetomen) beherbergen; sie pflegen sogar ihre Symbionten mittels raffiniertester Methoden auf die Nachkommenschaft zu vererben, und wenn man sie ihnen wegnimmt, so beobachtet man teils leichtere, teils schwere Schäden der Entwicklung.»⁽³³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾

Die Mikrobiom-Forschung fand und findet auch beim Nutztier «Honigbiene» (*Apis mellifera*) statt. Allerdings müssen wir uns immer darüber im Klaren sein, dass hier nur gezüchtete und bewirtschaftete Honigbienen untersucht werden können. Die in Deutschland wilde einheimische Dunkle Biene *Apis mellifera mellifera* hatte vermutlich ein völlig anderes Mikrobiom, das als Goldstandard



■ **Abb. 6:** Ungebetener Besuch eines Hirschkäfers in der Baumhöhlen-Bienenwohnung. Foto: © Wolfgang Schwarz

zum Vergleich mit den Imkerbienen hätte dienen können, deren Mikrobiom durch den Einsatz von Antibiotika, Zuckerwasser, schwermetallhaltigen Behandlungsmitteln und durch Stress im Lauf der letzten 100 Jahre vermutlich schwer geschädigt worden ist und damit stark verändert sein dürfte. Leider fand damals noch keine Mikrobiom-Forschung an der Dunklen Biene in freier Wildbahn statt, weshalb Aussagen, dass das Mikrobiom der Honigbiene so oder so aussieht, immer unter dieser Einschränkung betrachtet werden müssen.

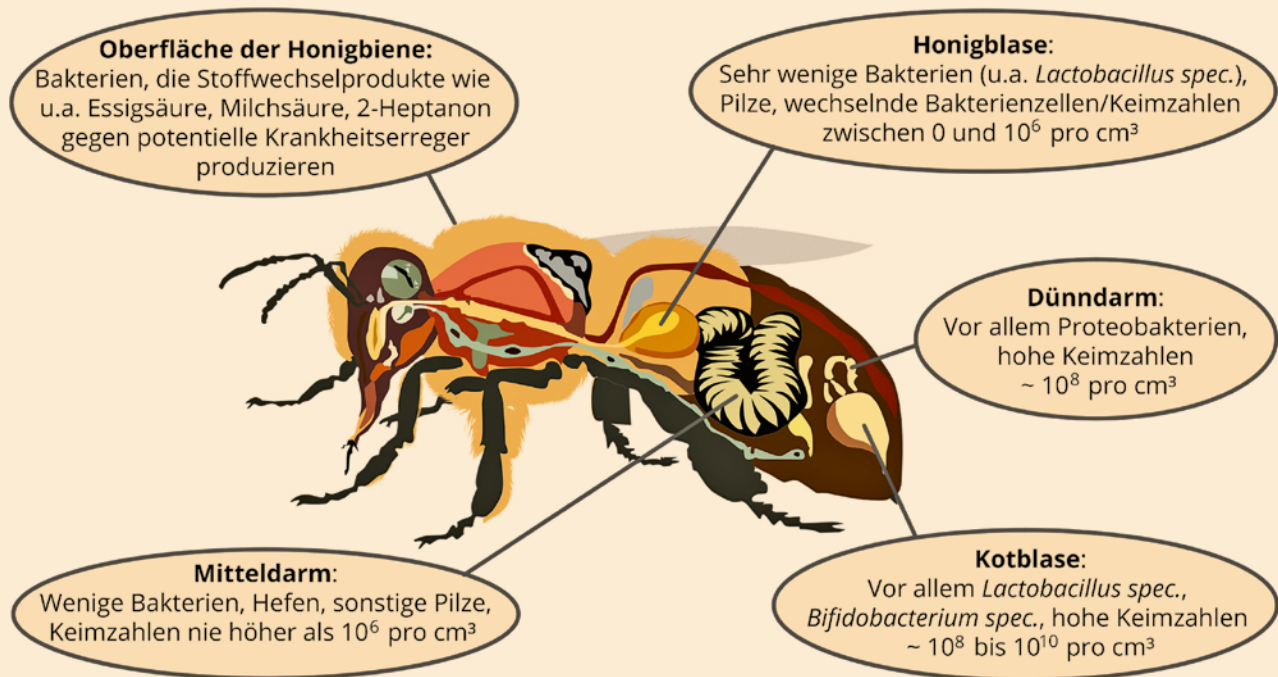
Es ist keine Überraschung, dass die aktuelle Forschung bei den Honigbienen zu den gleichen Ergebnissen kommt wie die Mikrobiom-Forschung an anderen Organismen. Die meisten Honigbienenstöcke sind mit zahlreichen Bakterien, Viren und Pilzen bevölkert, ohne Krankheitssymptome aufzuweisen. Im Gegenteil, die meisten Mikroorganismen, die ein Organismus beherbergt, sind für die Aufrechterhaltung des Stoffwechsels und des Immunsystems absolut notwendig.⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾ Studien über das Darmmikrobiom der Honigbiene *Apis mellifera* (aber sicher nur aus Imkerbeständen entnommenen oder verwilderten) zeigen, dass Honigbienen im Gegensatz zu den meisten

anderen Insekten ein hochgradig spezialisiertes Kernmikrobiom besitzen, welches «eine Rolle für den Stoffwechsel, die Immunfunktion, das Wachstum und die Entwicklung sowie den Schutz vor Krankheitserregern spielt. Die Forscherin Martha Gilliam hat in gesunden Bienenvölkern über 6000 Mikrobenstämme isoliert und identifiziert, die den Honigbienen verbunden und für das Immunsystem entscheidend sind.⁽³⁹⁾ Eine Störung des Darmmikrobioms hat nachweislich auch schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit der Bienen. Insgesamt deutet vieles darauf hin, dass das Darmmikrobiom eine wichtige Rolle für die Gesundheit und Krankheit der Bienen spielt.»⁽⁴⁰⁾⁽⁴¹⁾

Eine neue Studie von 2022 zeigt sehr eindrücklich die positiven Effekte von im Bienenvolk anwesenden bestimmten Milchsäurebakterien, die auch Teil des Mikrobioms sind, auf die Vitalität der Honigbienen: Eine erhöhte Langlebigkeit, eine verringerte Sterblichkeit, gesündere Kolonien, eine erhöhte Honigproduktion, eine gesteigerte Brutaktivität und eine erhöhte Genexpression von antimikrobiellen Enzymen.⁽⁴⁶⁾

Maggi und andere (2013) konnten zeigen, dass durch die Fütterung der Stoffwechselprodukte eines Milchsäurebakteriums sowohl die Brutaktivität im Bienenvolk gesteigert werden konnte als auch die Fettkörper der einzelnen Honigbiene zunahm.⁽⁴⁷⁾ Studien belegen auch die Anwesenheit vieler gesundheitsfördernder Mikroorganismen in Brutzellen, Pollen, Bienenbrot und Nektar.⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾ Die Qualität des Pollens hat einen entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung des Mikrobioms im Darm der Honigbiene und damit auf die Entwicklung hin zu einer gesunden erwachsenen Biene und einer langen Lebensdauer. Wurden frisch geschlüpfte Honigbienen mit altem Pollen gefüttert, entwickelten sie sich schlecht, hatten eine niedrigere Lebenserwartung und ein ungesünderes Mikrobiom als Honigbienen, die mit frischem Pollen gefüttert wurden.⁽⁵⁰⁾

Ein verändertes Mikrobiom führt zu verschiedensten Auswirkungen auf das Leben der Honigbienen. Nicht nur die Entwicklung von Brut und erwachsenen Honigbienen ist betroffen, sondern auch das Verhalten innerhalb und außerhalb des Bienenstocks. Diese Veränderungen sind das Ergebnis eines veränderten Immunsystems und gestörter Stoffwechselprozesse, welche wiederum die Wahrscheinlichkeit des Ausbruchs von Krankheiten erhöhen.⁽⁴⁰⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾ Wenn wir daran denken, dass bei Mäusen auch das Putzverhalten vom Mikrobiom gesteuert wird, wäre auch vorstellbar, dass auch das «VSH-Verhalten» (Ausräumen von mit *Varroa*-Milben belasteten Brutzellen), das «Grooming»



■ **Abb. 7:** Das Mikrobiom der Honigbiene *Apis mellifera*: Wir finden gesundheitsfördernde Mikroben nicht nur im Darm, sondern auch in der Honigblase, in der Futtersaftdrüse sowie auf der Oberfläche der Honigbienen. Sie produzieren unter anderem Stoffwechselprodukte, die eine schützende Rolle gegen Krankheitserreger wie die Varroa-Milbe spielen wie zum Beispiel Essigsäure, Milchsäure und 2-Heptanon (Pheromon).⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾ Datengrundlagen der Grafik: (Kluge, 1963)⁽⁴⁴⁾, (Kesznerová et al., 2017)⁽³⁷⁾, (Kwong et al., 2017)⁽³⁶⁾, (Raymann & Moran 2018)⁽⁴⁰⁾. Auch die Futtersaftdrüse (Anderson et al., 2022)⁽⁴⁵⁾ sowie die Mandibeldrüse weisen eine eigene Mikrobengemeinschaft auf. Zeichnung der Biene von adededi345 über Pixabay.

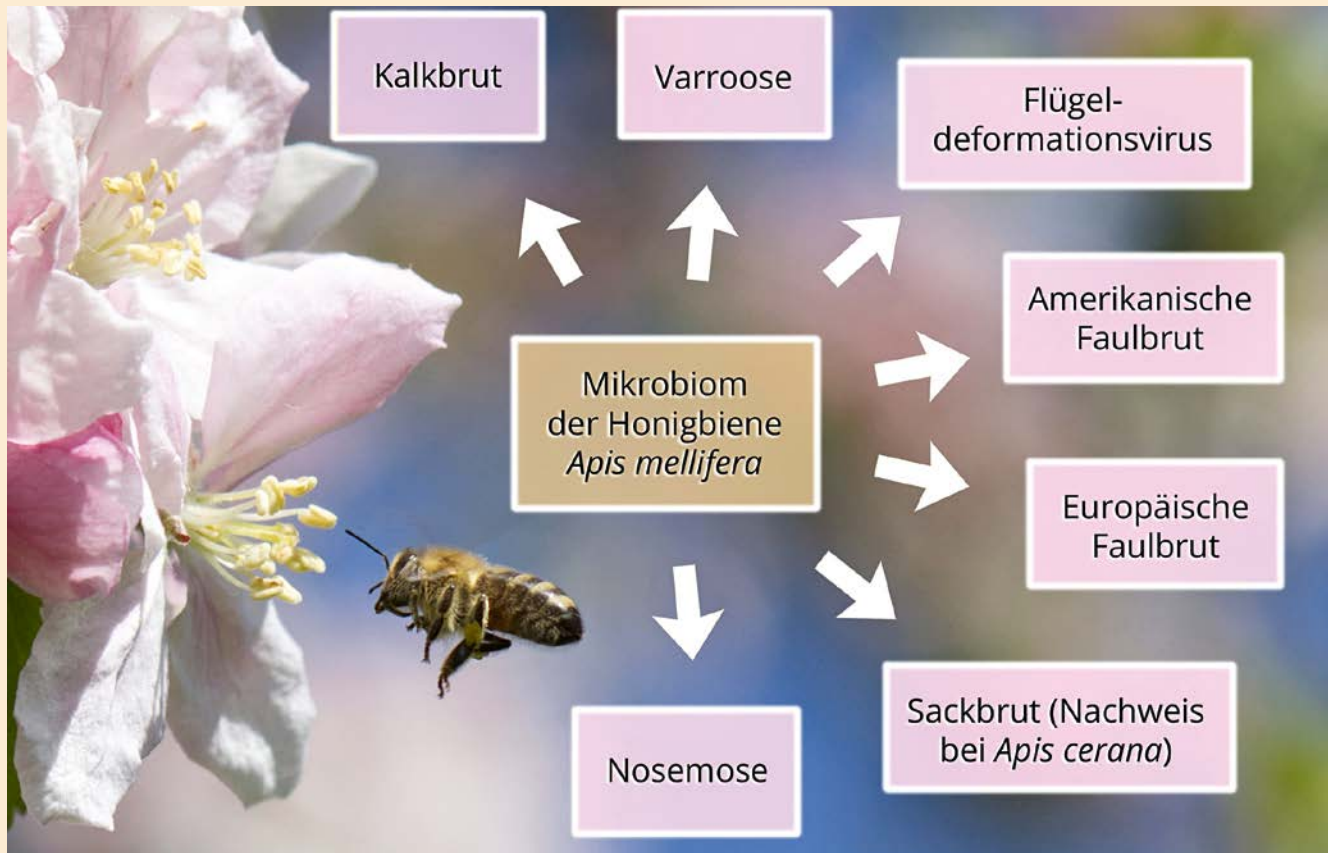
(das sich selbst und andere Putzen) sowie das «Recapping» (Öffnen und Verschließen von Brutzellen) vom Mikrobiom mit gesteuert werden und entsprechend bei einem reduzierten Mikrobiom nicht mehr so effektiv funktionieren. Diese Hypothese müsste noch überprüft werden.

DIE BEDEUTUNG DER SYMBIOTISCHEN MIKROBENGEMEINSCHAFT FÜR GESUNDHEIT UND KRANKHEIT

Die Zahl der Studien, die einen Zusammenhang zwischen dem Mikrobiom der Honigbiene bzw. bestimmten Bakterien dieses Mikrobioms und deren Wirksamkeit gegen «Krankheitserreger» herstellen, ist beeindruckend. Allein die Anwesenheit von bestimmten Milchsäurebakterien und anderen Bakterien im Mikrobiom der Honigbiene *Apis mellifera* und/oder im Mikrobiom von Pollen kann die Resistenz gegen die «Erreger» der Amerikanischen Faulbrut, der Europäischen Faulbrut, der Nosema, der Kalkbrut bis hin zur Varroa-Milbe bewir-

ken.⁽³⁹⁾⁽⁴⁰⁾⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾⁽⁵⁴⁾⁽⁴⁷⁾⁽⁵⁵⁾⁽⁴⁶⁾⁽⁴²⁾⁽⁴³⁾⁽⁵⁶⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁷⁾ Sacca & Lodesani (2020) sammelten auf der Oberfläche der Honigbienen Bakterien, die möglicherweise milbenschädigende Stoffwechselprodukte ausscheiden. Sie kultivierten vier ausgewählte Bakterien, damit auch die Stoffwechselprodukte in der Lösung vorhanden waren und besprühten damit Varroa-Milben. Drei der vier Bakterienlösungen töteten die Milben innerhalb von drei Tagen. Es scheint einen doppelt vorteilhaften Wirkmechanismus zu geben: Die Inhaltsstoffe (antimikrobielle Peptide) stärken die Immunität der Bienen und hemmen zugleich die Varroa-Milbe über die organischen Säuren und Bacteriocine, die die Bakterien bilden. Der pH-Wert hatte keinen Einfluss auf die Sterblichkeit der Milbe.⁽⁴²⁾

Sogar gegen bestimmte Viren wie das Flügeldeformations-Virus hilft ein gesundes Mikrobiom, wie Dosch und andere (2021) herausgefunden haben: Die Überlebensrate von Honigbienen, die mit einem artenreichen Mikrobiom geimpft wurden, war im Vergleich zu solchen, die mit einem gestörten Mikrobiom geimpft wurden, nach einer



■ **Abb. 8:** Der Einfluss des Mikrobioms der Honigbiene *Apis mellifera* auf Krankheiten. Datengrundlage: (Forsgren et al., 2010)⁽⁵¹⁾, (Daisley et al., 2020)⁽⁵³⁾, (Killer et al., 2014)⁽⁵⁴⁾, (Maggi et al., 2013)⁽⁴⁷⁾, (Iorizzo et al., 2020)⁽⁵⁵⁾, (Saccà et al., 2020)⁽⁴²⁾, (Dosch et al., 2021)⁽⁵⁸⁾, (Yun et al., 2022)⁽⁵⁹⁾

Virusgabe deutlich erhöht. Interessant dabei war zudem, dass beide Gruppen eine ähnlich hohe Viruslast aufwiesen, dass es also nicht die Menge an Viren ist, die den Unterschied ausmacht, sondern der Umgang des Immunsystems mit der Anwesenheit der Viren.⁽⁵⁸⁾

Schon 1963 untersuchte Roswitha Kluge die Darmflora der Honigbiene *Apis mellifera* und deren Auswirkung auf die Gesundheit mithilfe des folgenden Forschungsdesigns: Sie fütterte Honigbienen mit Pollen, der mit Antibiotika versetzt war, um die Darmflora abzutöten.

«Hierbei zeigte sich, dass die Lebensdauer der bakterienfreien Versuchsbienen einiger Versuchsgruppen gegenüber den Kontrollen mit normaler Darmflora stark herabgesetzt war. Bei den Bienen einzelner Käfige war die durchschnittliche Lebensdauer gegenüber den Kontrollen um 70 % gesenkt, bei anderen war die Beeinträchtigung bei gleicher Konzentration desselben Antibiotikums sehr viel geringer.»⁽⁴⁴⁾

Auffallend war zudem die starke Pilzentwicklung in der Kotblase; aufgrund der fehlenden Bakterien konnten die Pilzsporen auskeimen, durchdrangen teilweise sogar die Darmwandung und waren im Fettgewebe zu finden.⁽⁴⁴⁾

Die mit den Honigbienen vergesellschafteten gesundheitsfördernden Mikroorganismen können durch den Einsatz von Antibiotika, Ameisen- und Oxalsäuren (auch Thymol) reduziert werden. Ritter (2014) stellte in einem Vortrag auf einer Bienenkonferenz in Wien 2014 die Ergebnisse einer Studie von Murali Nayudu und Sheba Khan (2007) vor, die die Auswirkungen der Behandlungsmittel gegen die Varroa-Milbe auf die Darmflora der Honigbiene erforscht haben: Es zeigt sich, dass gesunde, unbehandelte Bienenvölker im Vergleich zu behandelten Völkern im Darm nicht nur wesentlich mehr Arten von Bakterien aufweisen (Diversität), sondern auch noch ungleich mehr Individuen dieser Arten.⁽⁶⁰⁾

MIKROBIOM UND GESUNDHEIT NATÜRLICH LEBENDER UND GEZÜCHTETER TIERE

Das Mikrobiom wild lebender Tiere unterscheidet sich sehr stark von dem im Labor oder in Gefangenschaft gehaltener Tiere.⁽⁶¹⁾⁽⁶²⁾⁽⁶³⁾ Wissenschaftler untersuchten 2017 das Mikrobiom gesunder Wildmäuse und das von Labormäusen, die zudem noch schlechtes, einseitiges Futter bekommen hatten. Es unterschied sich deutlich voneinander: Die Wildmäuse wiesen mehr Proteobakterien und Bacteroidetes-Stämme auf, die Labormäuse mehr Bacteroidetes- und Firmicutes-Stämme. Die Mikrobiota der Wildmäuse enthielt auch wesentlich mehr Arten als die der Labormäuse.⁽²⁹⁾ Es wäre interessant zu erforschen, inwieweit sich das Mikrobiom von Honigbienen unterscheidet, je nachdem, ob die Honigbienen mit Honig oder mit Zuckerwasser bzw. invertiertem Zuckersirup gefüttert werden. Vielleicht ist das dadurch veränderte Mikrobiom die Ursache für die deutlich unterschiedliche Lebenserwartung der Honigbienen, die in einer Studie mit Futter unterschiedlicher Qualität versorgt wurden.⁽⁶⁴⁾

Es liegt nahe zu vermuten, dass auch das Mikrobiom wild lebender Honigbienen in Bezug auf die Diversität wie auch die Individuendichte der jeweiligen Art oder des Stamms stark von dem des Nutztieres «Honigbiene» abweicht. Die Ursache liegt im unterschiedlichen Zugang zu den Mikroorganismen und den sich massiv unterscheidenden Umweltbedingungen: Honigbienen in Imkerhand sind trotz aller Einschränkungen im Vergleich zu Labormäusen noch mit ihrer Umwelt verbunden; aufgrund der künstlichen Zucht- und Haltungsbedingungen ist aber davon auszugehen, dass sich das Mikrobiom der Imkerbienen erheblich von dem der wild lebenden Honigbienen unterscheidet. Leider haben wir keine Kontrollstudien von wilden Honigbienen der einheimischen Dunklen Biene, mit der wir das Mikrobiom der verwilderten oder der Honigbienen in Imkerhand vergleichen und damit die vermutliche Änderung und Reduktion des Mikrobioms verdeutlichen könnten.

Für meine Vermutung, dass wild lebende Honigbienen in der Regel viel gesünder sind als gezüchtete Honigbienen, finden sich sowohl in der alten Imkerliteratur⁽¹²⁾ als auch in der neuesten Forschung⁽⁶⁵⁾⁽¹⁷⁾ starke Hinweise. Die wild lebenden Honigbienen überlebten und überleben trotz Tracheen-Milbe, Nosema und Amerikanischer Faulbrut (AFB). Es gab zwar in früheren Zeiten noch keine wissenschaftlichen Untersuchungen über die Art und Anzahl von Erregern auf wild lebenden (d. h. in unserem Fall verwilderten) Honigbienen, aber die Berichte, die wir

	Gesunde Bienenvölker	Kranke Bienenvölker
Anzahl Bakterien pro Darm	100.000.000 bis 1.000.000.000	10.000 bis 100.000
Bakterienarten pro Darm	25 bis 30	10 bis 15

■ **Tab. 1:** Auswirkungen der Behandlungsmittel gegen Varroa auf die Darmflora der Honigbiene. Nach: (Ritter, 2014)⁽⁶⁰⁾

aus den Imkerzeitschriften der 1950er-Jahre in Deutschland haben, geben uns klare Hinweise auf die Gesundheit oder Krankheit dieser Völker. Trotz der flächendeckenden Ausbreitung und Behandlung von Bienenkrankheiten wie Amerikanischer Faulbrut, Nosemose und Tracheen-Milben-Seuche mit chemischen Arzneimitteln lebten parallel zu den Völkern in Imkerhand durchgehend gesunde verwilderte Honigbienen in Baum- und Erdhöhlen.⁽⁶⁶⁾⁽⁶⁷⁾

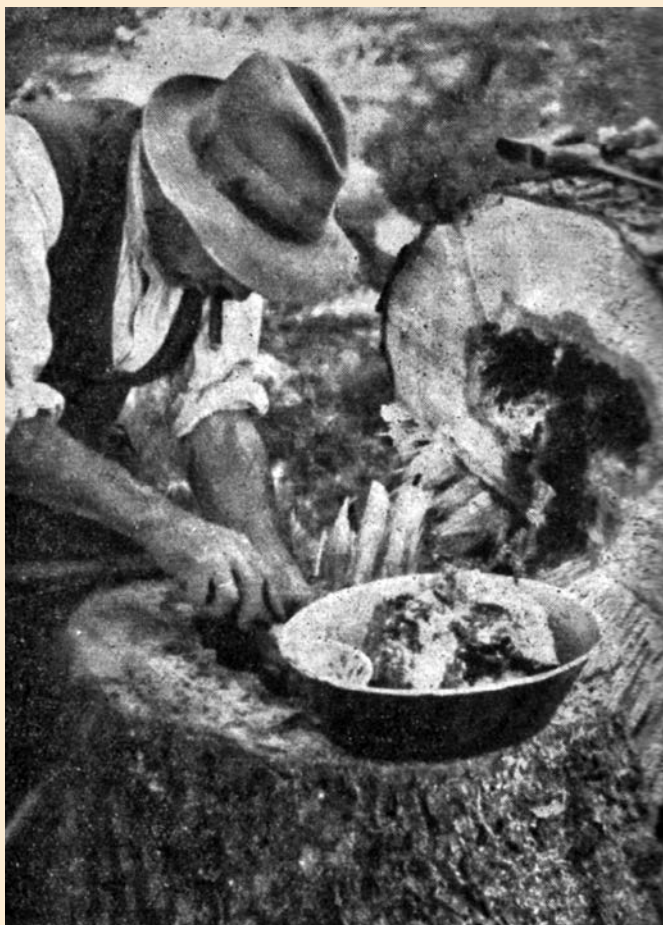
Herr Fischer (Württemberg) schrieb 1938 in seinem Beitrag «Sind hohle Bäume Faulbrutherde?»:

«Nach meiner langjährigen Erfahrung sind Faulbrutherde in 99 von 100 Fällen auf den Ständen der sogenannten Bienenhalter zu suchen. 36 Jahre habe ich meinen Bienenstand neben einem großen Park gehabt, in dessen Mitte sich viele große Linden und Eichen befanden, die jahrein und jahraus, bald hier, bald dort Bienenschwärme aufnahmen, die oft viele Jahre dort ihre Heimstätte hatten. Nie aber habe ich auf meinem Stande auch nur eine Spur von Faulbrut gehabt. In vielen Dörfern habe ich aber auf den Ständen die Faulbrut aufgestöbert und radikal ausgerottet. War dieses geschehen, so gab es in der betreffenden Gegend keine Faulbrut mehr, und die Stände gingen wieder hoch, obwohl es auch hier viele hohle Bäume gab. Es liegt nun in der Natur der Sache, daß die Faulbrut sich nicht so leicht in die ‚Naturbeuten‘ einnistet.»⁽¹²⁾

Zu dem Thema «Wildbienen und Krankheiten» finden wir in der Zeitschrift «Südwestdeutscher Imker» von 1954 eine sehr interessante Aussage. Dr. Klink hat in der Rubrik «Auslands-Rundschau» die Äußerungen des Direktors des französischen Forschungsinstitutes von Nancy, Dr. Moreaux, 1954 zum Thema «Wildbienen und Krankheiten» übersetzt und zusammengefasst:

«Die ansteckenden Krankheiten sind sicherlich bei den Wildbienenvölkern viel seltener als bei den Hausbienen völkern. Diese Annahme stützt sich auf Beobachtungen und Untersuchungen, die bei 37 abgefangenen Wildbienenschwärmen gemacht wurden. Alle Proben von diesen Schwärmen waren gesund. Dasselbe galt von den Schwärmen, die von Imkern gefaßt und eingeschlagen worden waren. Dr. Moreaux glaubt, daß die zum Teil unsachgemäße Behandlung der Bienen in den Mobilbeuten die Ausbreitung der Krankheiten begünstigt und hält es für erwiesen, daß die künstliche Fütterung der Bienen mit Zuckersirup einer der Gründe für die fortschreitende Schwächung und Degenerierung ist, die ihrerseits wieder die Ansteckung mit Mikroben und Parasiten begünstigt.»⁽⁶⁶⁾

Wild lebende Honigbienen waren also überall zu finden und wurden nicht als Bedrohung angesehen. Im Gegenteil, die Schwärme solcher Völker wurden von den Imkern sehr gern eingefangen. Der Imkerfreund gab 1952 Tipps, wie mit wilden Völkern umzugehen sei.



Auch die aktuellen Untersuchungen zeigen, dass wild lebende Honigbienen gesünder sind als Imkerbienen, was nicht weiter verwunderlich ist. In der Natur überleben kranke Völker nicht lange! Wild lebende Honigbienen bilden innerhalb von ein paar Jahren ein stabiles Gleichgewicht mit allen möglichen Krankheitserregern aus. Dies gilt nicht nur für die gefürchtete Varroa-Milbe, sondern auch für den Erreger der Amerikanischen Faulbrut. Weltweit werden Bienenvölker beobachtet, die ohne jegliche Varroa-Behandlung und ohne Zuckerrütterung überleben. Es handelt sich entweder um verwilderte Honigbienen in Wäldern oder Mauerritzen oder um Völker auf aufgelassenen Bienenständen. Sie unterlagen der natürlichen Selektion und haben nach anfänglichen hohen Verlusten ein Gleichgewicht in Form von stabilen Populationen aufgebaut.⁽¹³⁾⁽⁶⁹⁾⁽⁷⁰⁾⁽¹⁶⁾⁽⁷¹⁾⁽⁷²⁾ Das Forscherteam um Goodwin (2014) hat zur Amerikanische Faulbrut interessante Studien zusammengetragen und kommen zu folgendem Resümee: «Vielleicht haben die verwilderten Völker ein größeres Risiko, sich mit AFB von Völkern in Imkerhand zu infizieren, als es andersherum der Fall ist» und «Das geringe

■ **Abb. 9:** «Beim Baumfällen im Winter stößt man manchmal auf wilde Völker. Meistens sind sie dann durch Störung und Honigraub verloren. Ein Imker aber kann sie retten. Am besten durch Ausschneiden des ganzen Stammteils als Klotzbeute. Aber auch durch vorsichtiges Umschneiden in Rähmchen. Doch muß man mit baldiger Drohnenbrut durch Kälteschaden der Königin rechnen.»
Foto: © Herr Doering. Aus: (Der Imkerfreund 12/1952).⁽⁶⁸⁾

Vorhandensein dieser Krankheit in verwilderten Völkern deutet darauf hin, dass ein Großteil der AFB-Fälle, die von den beimkerten Völkern berichtet werden, auf die Imkertechniken zurückzuführen sind anstatt auf die Überkreuzkontamination von verwilderten Völkern». ⁽¹⁵⁾ Hornitzky und andere (1996) haben wie das Forscherteam um Goodwin (1994) verwilderte Honigbienen auf die Anwesenheit von Sporen der Amerikanischen Faulbrut untersucht und kamen zu übereinstimmenden Ergebnissen: Von 60 verwilderten Völkern enthielt nur ein Volk Sporen von AFB, und dieses Volk lebte in der Nähe von Imkervölkern. Alle anderen 59 Völker lebten weit von Imkervölkern entfernt, was sie zu der Aussage bringt, «(...) dass die Populationen der verwilderten Honigbienen ein unwahrscheinliches Reservoir von AFB für Bienen in Beuten darstellt». ⁽¹⁴⁾ Neue Untersuchungen bestätigen, dass wild lebende Völker häufig weniger Nosema-Sporen aufweisen als Imkervölker; weisen sie aber ähnlich hohe Werte an Sporen auf, bricht die Krankheit dennoch seltener aus. ⁽⁷³⁾

5 Der Einfluss von Umweltfaktoren auf den Organismus und sein Mikrobiom

DAS ZUSAMMENSPIEL VON LEBEWESEN, MIKROORGANISMEN UND UMWELT IM RAHMEN DER EVOLUTION

Wir haben uns in einem ersten Schritt erarbeitet, dass ein Lebewesen nicht allein existiert, sondern eine Mikrobengemeinschaft beherbergt, ohne die es nicht überleben kann. Die Forschungsergebnisse, die den Einfluss des Mikrobioms auf Entwicklung, Verhalten und Erkrankung dokumentieren, sind sehr beeindruckend und könnten uns nun auf eine ebenso geniale wie simple Idee bringen: Wir stärken einfach das Mikrobiom der Honigbiene und lösen damit alle Probleme im Bienenstock. Das klingt erst mal vernünftig, greift aber zu kurz. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat die Wissenschaft erkannt, dass die genetische Ausstattung des Organismus samt seinem Mikrobiom allein die Anpassung der Organismen an die Umwelt nicht erklären kann. Alle Versuche, die Veränderungsprozesse auf die genetische Ausstattung eines Organismus zurückzuführen, griffen zu kurz, weshalb die neueste Forschung auf komplexe Zusammenhänge schaut und diese beschreibt.

«Gene und genetische Faktoren allein reichen daher als Erklärung des Selbstseins eines Organismus nicht aus. Wir müssen auch die unmittelbare Umgebung und das persönliche Milieu berücksichtigen, wenn wir komplexe und individuelle Lebensprozesse wie auch etwa das individuelle Verhalten verstehen wollen. Das ist das Kernanliegen von Eco-Evo-Devo.» ⁽²⁵⁾

Die Abkürzung «Eco-Evo-Devo» bedeutet «ecological evolutionary developmental biology» oder «Ökologische evolutionäre Entwicklungsbiologie» und beschreibt unter anderem die Einflüsse des Mikrobioms eines Organismus sowie verschiedener Umweltfaktoren auf Entwicklung und Verhalten eines Lebewesens sowie auf die Ausbildung von Krankheiten. Die Forschung zeigt auf, dass ein Lebewesen nicht allein entscheidet, welche seiner Gene an- oder abgeschaltet werden, um den Organismus und die Nachkommen aufzubauen; auch die Umweltfaktoren wie Temperatur, Ernährung usw. bestimmen mit, welche Gene an- und abgeschaltet werden und damit, wie sich alle Entwicklungsstadien eines Organismus wie Ei, Larve, Puppe und erwachsene Organismen entwickeln. ⁽⁷⁴⁾⁽⁷⁵⁾⁽⁷⁶⁾ Wir haben es also mit einem Zusammenspiel von Lebewesen, vergesellschafteten Mikroorganismen und Umweltfaktoren zu tun.