

Aus dem Department für Biomedizinische Wissenschaften  
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Institut/Klinik für Physiologie, Pathophysiologie und Biophysik  
(Leiter: Univ.-Prof. Dr. med. vet. Dr. med. Reinhold Erben)

**Mikrobiota im equinen Gastrointestinaltrakt: aktueller Wissensstand  
unter Berücksichtigung altersspezifischer Besonderheiten**

Bachelorarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von  
Jasmin Hasenöhr

Wien, August 2023

Betreuerin: Ass-Prof. Dr. med. vet. Franziska Dengler

## **Vorwort**

Pferde hatten schon immer einen sehr hohen Stellenwert in meinem Leben, daher war mir auch von Anfang an klar, dass mich sowohl mein privater als auch beruflicher Lebensweg nur im Beisein von Pferden erfüllen wird.

Diese Arbeit widme ich dem einzigartigen Pferd meiner Großeltern „Natascha“, welche mir den ersten richtigen Umgang lehrte und ich als kleines Mädchen reiten lernen durfte. Mittlerweile ist Natascha 29 Jahre alt und zeigt viele der typischen altersbedingten Veränderungen.

Des Weiteren finde ich das Thema dieser Arbeit spannend, weil es ausnahmslos alle Pferdebesitzer/innen betrifft. Altern ist ein natürlicher und unvermeidbarer Prozess. Ein grundlegendes Wissen, welche Veränderungen mit diesem Prozess verbunden sind, kann für jeden nur von Vorteil sein. In enger Verbindung dazu steht die Ernährung eines Pferdes. Alte Pferde haben besondere Bedürfnisse, auf die geachtet werden muss, zumal eine falsche Fütterung auch ernährungsbedingte Krankheiten begünstigen kann.

Ich möchte mich besonders bei meinen Großeltern Traude und Günter bedanken. Durch ihr Hobby – das Reiten – hatte ich das Glück, mit Pferden aufwachsen zu können.

Außerdem danke ich meinen Eltern Sonja und Thomas sowie meinem Freund Marcus für die unglaubliche Unterstützung während meines Studiums.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Betreuerin Ass-Prof. Dr. med. vet. Franziska Dengler, da sie jederzeit ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mir stets hilfsbereit zur Seite stand.

# Inhaltsverzeichnis

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung.....   | 1  |
| 2     | Der Verdauungstrakt des Pferdes .....   | 2  |
| 2.1   | Anatomische Grundlagen .....  | 2  |
| 2.1.1 | Maul und Speiseröhre.....   | 3  |
| 2.1.2 | Magen .....   | 3  |
| 2.1.3 | Dünndarm.....   | 3  |
| 2.1.4 | Dickdarm .....  | 3  |
| 2.2   | Physiologische Grundlagen .....   | 5  |
| 3     | Das equine Mikrobiom .....  | 8  |
| 3.1   | Definition und Funktion .....   | 8  |
| 3.2   | Das Kernmikrobiom des Pferdes .....   | 8  |
| 3.3   | Vergleich der Mikrobiota in verschiedenen Kompartimenten des<br>Gastrointestinaltrakts..... | 10 |
| 4     | Einflüsse auf die equine Mikrobiota.....  | 14 |
| 4.1   | Altersbedingte Einflüsse auf die equine Mikrobiota.....                                     | 15 |
| 4.1.1 | Die Mikrobiota der Neugeborenen und deren Entwicklung.....                                  | 15 |
| 4.1.2 | Altersbedingte Veränderungen der Mikrobiota .....   | 19 |
| 4.2   | Ernährungsbedingte Einflüsse auf die equine Mikrobiota.....                                 | 21 |
| 4.2.1 | Auswirkungen der Rationszusammensetzung .....   | 22 |
| 4.2.2 | Fütterungszeiten und Futterentzug .....   | 24 |
| 4.2.3 | Probiotika und Präbiotika .....   | 25 |
| 5     | Diskussion .....  | 28 |
| 6     | Fazit.....  | 32 |
| 7     | Zusammenfassung .....   | 33 |
| 8     | Summary .....   | 34 |
| 9     | Abbildungsverzeichnis .....   | 35 |
| 10    | Abkürzungsverzeichnis .....   | 36 |
| 11    | Literaturverzeichnis.....   | 37 |

## 1 Einleitung

DNA-Sequenzierungsmethoden steigerten den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse über mikrobielle Ökosysteme, insbesondere des Verdauungstrakts, in den vergangenen 15 Jahren enorm und ermöglichen somit die Erforschung dieses speziellen Ökosystems, das für Pferde angesichts ihres hochempfindlichen Gastrointestinaltrakts eine besonders wichtige Rolle spielt. Die sogenannte Mikrobiota ergibt sich aus der Gemeinschaft von Bakterien, Archaeen, Pilzen und Protozoen und ist in ihrer Zusammensetzung das Ergebnis einer langen evolutionären Anpassung des Wirts an seine Ernährung [1]. Da zwischen Gesunderhaltung und Krankheitsentstehung oft nur ein schmaler Grat liegt, ist ein genaues Verständnis der Funktionalität der Mikrobiota und deren Beeinflussung sowie Bedeutung für die Gesundheit des Pferdes von großem Interesse. Allerdings unterliegt die Mikrobiota-Zusammensetzung von Pferden einer hohen Variabilität bedingt durch verschiedene Managementsysteme, Rassen und Fütterungsstrategien sowie die individuelle Variabilität, sodass die Mikrobiota kaum pauschalisiert werden kann [2].

Als einziger Einfluss, welcher ausnahmslos auf alle Pferde zutrifft, kann der natürliche und unvermeidbare Reifungs- und Alterungsprozess genannt werden. Darum verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, den aktuellen Wissensstand zu mikrobiellen Veränderungen aufgrund des Alters darzulegen. Wie schon erwähnt spielt auch die Ernährung eine bedeutungsvolle Rolle in Bezug auf die Zusammensetzung der Mikrobiota. Aufgrund ihrer Wichtigkeit sowohl als alleiniger Einflussfaktor als auch in Korrelation mit dem Alter fließen ebenso Daten über ernährungsbedingte Veränderungen in diese Arbeit ein.

Zu Beginn dieser Literaturarbeit wird eine Einführung in die anatomischen und physiologischen Grundlagen des equinen Gastrointestinaltrakts gegeben. Darauf folgen Ausführungen zur equinen Mikrobiota, deren Definition und Zusammensetzung sowie Daten zur Entstehung und Entwicklung der Mikrobiota, ehe speziell auf die zuvor ausgewählten alters- und ernährungsbedingten Einflussfaktoren, die häufig in enger Verbindung zueinander stehen, eingegangen wird. Die Arbeit soll einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand bieten sowie eventuelle Zusammenhänge, aber auch widersprüchliche Ergebnisse und Lücken in diesem Bereich aufzeigen.

## 2 Der Verdauungstrakt des Pferdes

Pferde sind Pflanzenfresser mit einem einfachen Magen. Als sogenannte Hinterdarmfermenter gilt bei ihnen der Dickdarm als primärer Ort für die Fermentation von faserigen Futtermitteln [3]. Der Gastrointestinaltrakt eines adulten Warmblutpferdes hat eine Länge von etwa 30 Metern (m) und ein Volumen von 150 Litern (l) [4].

Die verschiedenen anatomischen Regionen des Magen-Darm-Trakts müssen untereinander im Einklang sein, um notwendige Funktionen wie Verdauung und Weitertransport der Nahrung ausführen zu können. Dieses Zusammenspiel der einzelnen Darmabschnitte ist besonders für die Unterstützung und Aufrechterhaltung der Tiergesundheit wichtig [4].

### 2.1 Anatomische Grundlagen

Der Vorderdarm des Pferdes setzt sich aus Maul, Speiseröhre, Magen und Dünndarm zusammen. In diesem Darmabschnitt finden physikalische und chemische Verdauungsprozesse mit geringer mikrobieller Wirkung statt [4].

Der Blinddarm (Caecum), Grimmdarm (Colon) und Mastdarm (Rektum) bilden den Hinterdarm des Pferdes. Die Transitzeit unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Kompartimenten. Während die Passage durch den Magen und Dünndarm mit durchschnittlich fünf Stunden relativ schnell erfolgt, ist im Blind- und Dickdarm eine Verweildauer von ungefähr 35 Stunden üblich [5]. Die einzelnen Abschnitte sind in Abbildung 1 dargestellt und werden im Folgenden näher beschrieben.

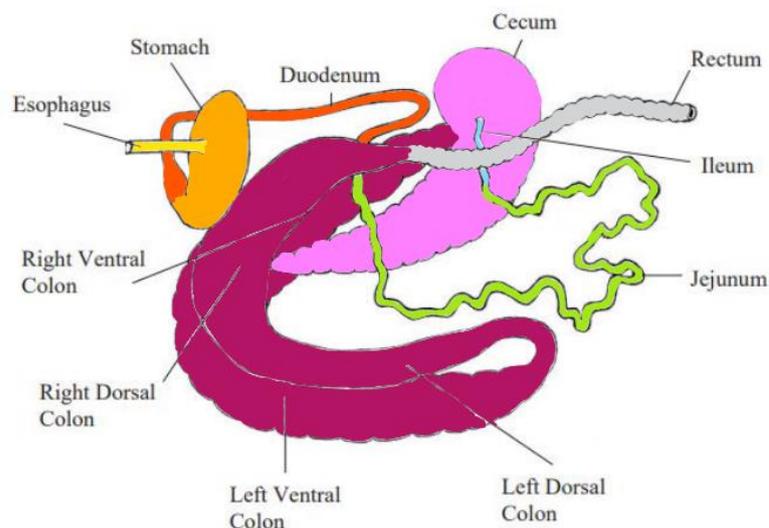


Abb. 1: Aufbau des Gastrointestinaltrakts eines adulten Pferdes [5].

### **2.1.1 Maul und Speiseröhre**

Pferde nehmen ihre Nahrung mit den Lippen auf und zerkleinern sie durch mahlend, kreisende Kaubewegungen mit den Zähnen im Maul. Diese Bewegungen verringern die Größe der Futterpartikel, vergrößern jedoch deren Oberfläche und unterstützen somit die enzymatische Verdauung [4]. Die aufgenommene Nahrung gelangt nach dem Schluckakt über den Rachen in die ca. 1,5 m lange Speiseröhre. Durch die im Maul produzierten Speichelmengen ist die Nahrung ausreichend geschmiert, um in den Magen zu gelangen [3].

### **2.1.2 Magen**

Der Magen des Pferdes hat ein Fassungsvermögen von 8-16 l und befindet sich links unterhalb des Brustkorbs. Zu seinen Hauptaufgaben zählt die Speicherung, Mischung sowie Zerlegung des Futters. Durch Salzsäuresekretion und zyklische Kontraktionen der Magenwandmuskeln wird die Verdauung eingeleitet [6].

### **2.1.3 Dünndarm**

Der Dünndarm des Pferdes setzt sich aus dem Duodenum (Zwölffingerdarm), Jejunum (Leerdarm) und Ileum (Krummdarm oder Hüftdarm) zusammen. Der Zwölffingerdarm befindet sich auf der rechten Seite und ist durch ein ca. 3-5 cm langes Mesenterium an der dorsalen Körperwand des Pferdes aufgehängt. Das kurze Mesenterium – das Aufhängeband des Darms – verhindert die Beteiligung des Zwölffingerdarms an Verlagerungen von Darmschlingen [4]. Der Leerdarm hingegen kann aufgrund seiner Länge von etwa 20 m und seinem dementsprechend langen Mesenterium leicht an Einklemmungen des Dünndarms beteiligt sein. Gegen Ende des Leerdarms ist eine Verengung des Lumens aufgrund einer muskulöseren Darmwand zu erkennen. Als Krummdarm wird der untere Teil des Dünndarms bezeichnet, welcher sich an der dorsomedialen Seite mit dem Blinddarm verbindet [6].

### **2.1.4 Dickdarm**

Der Dickdarm (Abb. 2) des Pferdes wird in einen großen und einen kleinen Grimmdarm (Colon) sowie den Blinddarm (Caecum) unterteilt.

Mit einer Länge von 1,5-2 m fasst der Blinddarm eines Warmblutpferdes ca. 30 l Ingesta. Die Blinddarmmuskulatur sorgt mithilfe von Kontraktionen für eine koordinierte Vermischung der aufgenommenen Nahrung. Anschließend gelangt die vom Blinddarm in Konsistenz und Zusammensetzung veränderte Nahrung in den großen Dickdarm [6].

Der große Dickdarm des Pferdes fasst etwa 75 l und teilt sich in vier Abschnitte: rechts ventraler, links ventraler, rechts dorsaler und links dorsaler Dickdarm [3]. Der rechte ventrale Teil des Dickdarms, welcher sich vom Brustkorb bis zum Flankenbereich erstreckt und einen Durchmesser von 25-30 cm aufweist, schließt direkt an das Caecum an. Durch die Verstärkung der Längsmuskelschicht, auch als Tänen bekannt, entstehen Ausbuchtungen der Dickdarmwand, die sogenannten Haustren. Sie verleihen dem Darm ein segmentiertes Aussehen und helfen dabei, Pflanzenfasern zu vermischen bzw. zurückzuhalten, bis diese durch die Verdauungsprozesse weiter zerlegt wurden [6].

Durch die Darmmotorik gelangt die Nahrung in den links ventral liegenden Dickdarm, welcher ebenfalls großlumig und segmentiert ist. Dort wandert sie nach kaudal in Richtung des linken Flankenbereichs des Pferdes. Der Durchmesser des Dickdarms verringert sich ab dem Beckenbereich. Durch die schlaufenförmige Anordnung des Dickdarms kann es aufgrund von Verlagerungen zu Einklemmungen kommen. Klinisch auffällig ist hier besonders die *Flexura pelvina*, da sie oft an Obstruktionen des Dickdarms beteiligt ist [6].

Peristaltik im linken ventralen Dickdarm sorgt für einen weiteren Transport des Nahrungsbreis in Richtung des linken dorsalen Dickdarms. Ist die Verdauung ausreichend fortgeschritten, findet eine Weiterleitung der Nahrung in den rechten dorsalen Dickdarm statt, welcher sich wieder auf einen Durchmesser von 30-35 cm erweitert [6].

Die Hauptaufgabe des kleinen Dickdarms – das Rektum oder der Mastdarm – ist die Wasseraufnahme. Hier werden Kotballen gebildet und damit der Verdauungsvorgang im Magen-Darm-Trakt des Pferdes abgeschlossen [3].

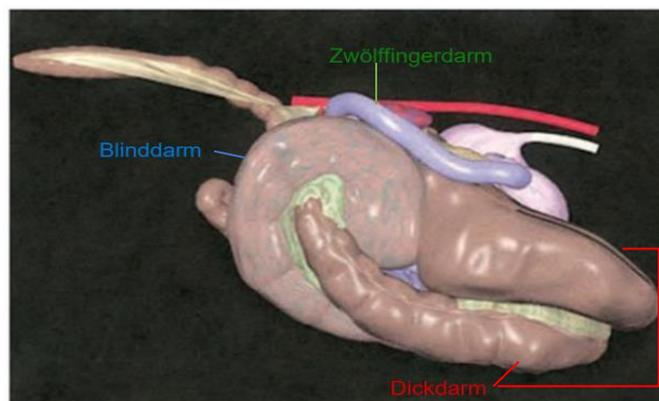


Abb. 2: Rechte Seitenansicht mit Darstellung des Blinddarms, rechter Dickdarm und Zwölffingerdarm [6].

## 2.2 Physiologische Grundlagen

Die von den Lippen aufgenommene Nahrung wird nach Zerkleinerung im Maul mit Hilfe großer Speichelmengen, welche eine Höhe von 10-12 l/Tag erreichen können, durch die Speiseröhre transportiert [6]. Mit seiner puffernden Wirkung hilft der Speichel den pH-Wert im Magen zu regulieren [3].

Die Speiseröhre mündet in den anfangs drüsenlosen Magen, jedoch werden proteolytische Enzyme der im Pylorus befindlichen Drüsen abgesondert. Ein Großteil des Futters verbleibt 2-6 Stunden im Magen [7]. Hier werden in geringem Umfang Kohlenhydrate zu Milchsäure und kurzkettigen Fettsäuren (engl. short chain fatty acids, SCFA) fermentiert und der pH-Wert durch die Sekretion von HCl auf ca. 2,6 gesenkt. Anschließend kommt es im Dünndarm zum enzymatischen Abbau und Absorption von Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten [6]. Bei den aufgenommenen Endprodukten der Kohlenhydrate handelt es sich um verschiedene Einfachzucker, hauptsächlich aber um Glukose. Die Endprodukte der Getreideverdauung bei Vormagenverdauern, beispielsweise bei Rindern, sind SCFA, welche im Vergleich zu den Glukose-Endprodukten des Pferdes eine geringere Energieeffizienz auszeichnet. Daraus kann geschlossen werden, dass Pferde effizienter in der Nahrungsverwertung sind als manch andere Tiere [8].

Der Dünndarm bildet den primären Ort der Protein- und Aminosäureverdauung. Hier werden 60-70 Prozent (%) des gesamten Nahrungsproteins verdaut und absorbiert, der Rest davon gelangt schlussendlich in den Dickdarm. Das bedeutet, dass die aufgenommenen Aminosäuren von der Aminosäurezusammensetzung des Futters abhängig sind. Dieses Erkenntnis verdeutlicht den oft hohen Aminosäuregehalt der Nahrung, welcher besonders für junge und noch im Wachstum befindliche Pferde von Bedeutung ist [8].

Auch bei der Fettverdauung spielt der Dünndarm als erste Anlaufstelle für die Aufnahme von Fettsäuren aus der Nahrung eine wesentliche Rolle. Die Zusammensetzung der Nahrungsfette kann das Körperfett des Tieres beeinflussen. Das deutet darauf hin, dass die Fette im Dünndarm aufgenommen werden, bevor sie durch Bakterien im Dickdarm verändert werden können. Fettlösliche Vitamine und auch B-Vitamine werden ebenso größtenteils im Dünndarm absorbiert [8].

Die Neutralisierung des pH-Wertes auf 7,0-7,4 sowie die Emulgierung der Fette erfolgt im Zwölffingerdarm durch die abgesonderte Galle [6]. Das Pferd besitzt keine Gallenblase, daher sondert die Leber kontinuierlich Gallensäuren ab [3].

Im Leer- und Krummdarm vergrößern Zotten und Mikrovilli die Epithelfläche, wodurch aufgrund der Oberflächenvergrößerung die Aufnahme der Nährstoffe erleichtert wird [3].

Leicht verdauliche Nahrungsbestandteile können bereits drei Stunden nach der Aufnahme den Blind- und Dickdarm erreichen [7], welche große Fermentationskammern zum Aufschluss komplexer Kohlenhydrate aus Pflanzenfasern bilden und werden dort von den Darmbakterien zu SCFA, vor allem zu Acetat, Propionat sowie Butyrat abgebaut [8]. Im Blinddarm haben Mikroorganismen bis zu sieben Stunden Zeit, um die Ballaststoffe zu verdauen, da die Blinddarmgröße die Passage verlangsamt [3].

Strukturell betrachtet besitzt der Blinddarm zwei ventilartige Klappen, welche relativ dicht zusammenliegen. An der Verbindungsstelle zwischen Ileum und Caecum befindet sich die sogenannte Ileocaecalklappe, die den Reflux von Darminhalt des Dickdarms in den Dünndarm verhindert. Durch die Öffnung des Colons wird die *Valva caecocolica* gebildet und ermöglicht den weiteren Transport der Nahrung aus dem Blinddarm in den Dickdarm. Endprodukte der mikrobiellen Fermentation sind SCFA, Ammoniak, B-Vitamine sowie Aminosäuren. Zudem werden Mineralien und Elektrolyte wie zum Beispiel Natrium, Chlorid und Kalium gemeinsam mit Wasser aufgenommen, bevor die Nahrung in Richtung Mastdarm weiterwandert [3].

Der voluminöse Verdauungstrakt des Pferdes ist besonders für die Verdauung von faserreichen und energiearmen Nahrungsbestandteilen geeignet. Im Dickdarm des Pferdes wird Gras mikrobiell hydrolysiert und anschließend zu SCFA fermentiert. Ungefähr 60-70 % der SCFA werden aus dem Blind- und Dickdarm absorbiert [9]. Als Folge der Domestizierung wurde das natürliche Nahrungsaufnahmeverhalten des Pferdes durch das zugeführte Futter aus Menschenhand verändert [9]. Um den Leistungsanforderungen gerecht werden zu können, werden Pferden häufig leicht hydrolysierbare Kohlenhydrate in Form von Getreide zugefüttert. Das Ziel dieser stärkehaltigen Zufütterung ist eine gesteigerte Energiegewinnung, welche für die geforderte Arbeit verwendet werden kann [9].

Zu beachten ist dabei jedoch, dass überschüssige Energie, die bei der Leistungserbringung nicht verbraucht wird, Stoffwechselstörungen und andere Erkrankungen, wie zum Beispiel Fettleibigkeit begünstigt [10].

Der hohe Stärkegehalt des Getreides kann im Blind- und Dickdarm fermentiert werden, wobei Stärke in zu hohen Mengen das Wachstum amylolytischer Bakterien begünstigt. Als Folge dessen steigt die Produktion flüchtiger Fettsäuren sowie der Milchsäure und führt zu einem deutlich niedrigeren pH-Wert [7]. Reizungen der Darmschleimhaut, welche durch die Ansammlung von Milchsäure hervorgerufen werden, können diese durchlässiger für Toxine oder größere Moleküle machen.

Ein zu niedriger pH-Wert führt zur Schädigung der Epithelauskleidung und die in der Nahrung enthaltenen Nährstoffe können nicht optimal aufgenommen werden. Darum ist es für eine optimale Verdauung unerlässlich, die Mikrobiota des Magen-Darm-Trakts stets in einem ausgeglichenen Verhältnis zu wahren [7].

## **3 Das equine Mikrobiom**

### **3.1 Definition und Funktion**

Der Gastrointestinaltrakt des Pferdes beherbergt eine Vielzahl an Mikroorganismen, dazu zählen Pilze, Bakterien, Parasiten, Protozoen und Archaeen. Die Gemeinschaft aller Mikroorganismen wird als Mikrobiota bezeichnet, das dazugehörige genetische Material als Mikrobiom [11]. In der Literatur werden die Begriffe Mikrobiom und Mikrobiota häufig synonym verwendet [11].

Dabei wird zwischen residenten und transienten Mikroorganismen unterschieden. Während residente Mikroorganismen regelmäßig über mehrere Wochen nachweisbar sind, werden transiente Mikroorganismen meist mit der Nahrung aufgenommen und sind im gesunden Magen-Darm-Trakt des Pferdes nicht vermehrungsfähig. Die Zusammensetzung der Darmflora wird von Faktoren wie der Ernährung, dem Alter, Gallensäurekonzentration, Umgebungsbedingungen sowie der Epithelerneuerungsrate bestimmt und stimmt bei Menschen und monogastrischen Tieren weitgehend überein [12].

Aus ernährungsphysiologischer Sicht kann die Darmflora des Pferdes mit der Vormagenflora des Rindes verglichen werden. So bauen beispielsweise mikrobielle Enzyme Hemizellulosen zu resorbierbaren, flüchtigen Fettsäuren ab. Neben den nutritiven Funktionen übernimmt die Darmflora noch weitere wichtige Aufgaben. Die Anpassungsfähigkeit der residenten Keime an das umgebene Milieu und die Fähigkeit zur Nischenbesetzung ermöglichen einen Schutz vor der Besiedelung pathogener Mikroorganismen. Zudem ist die residente Flora in der Lage, Stoffwechselprodukte zu bilden, welche auf andere Keimarten toxisch wirken. Dadurch entstehen Standortvorteile gegenüber anderen Keimen. Eine weitere wichtige Funktion der residenten Flora ist die stimulierende Wirkung auf das darmassoziierte Immunsystem [12].

### **3.2 Das Kernmikrobiom des Pferdes**

Aktuell liegen im Gegensatz zur Datenlage in der Humanmedizin nur wenige Daten über die Bedeutung von Archaeen, Viren und Eukaryoten im Magen-Darm-Trakt des Pferdes sowie deren Beitrag zu einem gesunden Mikrobiom vor. Es ist jedoch bekannt, dass sich bis zu  $10^{15}$  Bakterienzellen im equinen Darmtrakt befinden können, die meisten davon im Dickdarm [11]. Jedes Kompartiment des Pferdedarms weist eine individuelle Zusammensetzung der Mikrobiota auf, wobei benachbarte Kompartimente mehr Ähnlichkeit haben als weiter

entferntere Kompartimente. Grundsätzlich wird zwischen zwei Hauptregionen unterschieden: der vordere und hintere Gastrointestinaltrakt. Dabei weist der vordere Magen-Darm-Trakt eine variabelere Zusammensetzung auf als der hintere, wo eine stabilere Mikrobiota-Zusammensetzung trotz unterschiedlichen Alters und Rasse bekannt ist [11].

Das sogenannte Kernmikrobiom fasst die Mikroben, welche bei den meisten Individuen vorkommen, zusammen. Firmicutes machen dabei mit 40-90 % den größten Stamm der Darmbakterien in verschiedenen Kompartimenten aus. Trotz des geringen Anteils der Familien *Ruminococcaceae* und *Fibrobacteraceae* an der Bakteriengemeinschaft sind sie als Teil des Kernmikrobioms des Pferdes angesehen [11].

Die nächste große Gruppe ist die der Proteobakterien, welche gramnegative Bakterien, darunter *Enterobacteriales* und *Pseudomonadales*, einschließen. Die Gruppe der Proteobakterien ist im vorderen Teil des Magen-Darm-Trakts zu finden, vor allem im Ileum ist ihr Anteil besonders hoch. Neben ihren physiologischen Funktionen kann ein Überschuss dieser Bakteriengruppe zu Entzündungen des Darms sowie Dysbiose führen [11].

Die drittgrößte Gruppe bilden die Verrucomikroben, welche besonders im Boden vorkommen und mit einer Häufigkeit von 10-23 % besonders den Blinddarm, Dünndarm sowie das Rektum besiedeln [11].

Eine Studie von Morrison *et al.* zeigte im Vergleich dazu, dass der Stamm Bacteroidetes in den Faeces von Pferden dominierte. Den zweitgrößten Anteil bildet der Stamm der Firmicutes, gefolgt von Fibrobacteres. Zudem wurden Spirochäten und Proteobakterien nachgewiesen, wobei die relative Häufigkeit im Vergleich zu den Hauptstämmen eher gering war [13].

Pferde haben einen empfindlichen Darmtrakt, verschiedene Faktoren wie zum Beispiel Bewegung, Transporte oder Futterpausen wirken sich auf die Zusammensetzung des Mikrobioms aus und sorgen für nachweisbare Veränderungen. Außerdem weist die Kerngemeinschaft bei domestizierten Pferden eine deutlich geringere Bakteriendiversität auf als bei Wildpferden, was als ein Grund für die hohe Empfindlichkeit der Darmgesundheit angesehen werden kann [11].

### 3.3 Vergleich der Mikrobiota in verschiedenen Kompartimenten des Gastrointestinaltrakts

Costa *et al.* untersuchten die Zusammensetzung der Mikrobiota in den verschiedenen Kompartimenten des Gastrointestinaltrakts (Abb.3) [14].

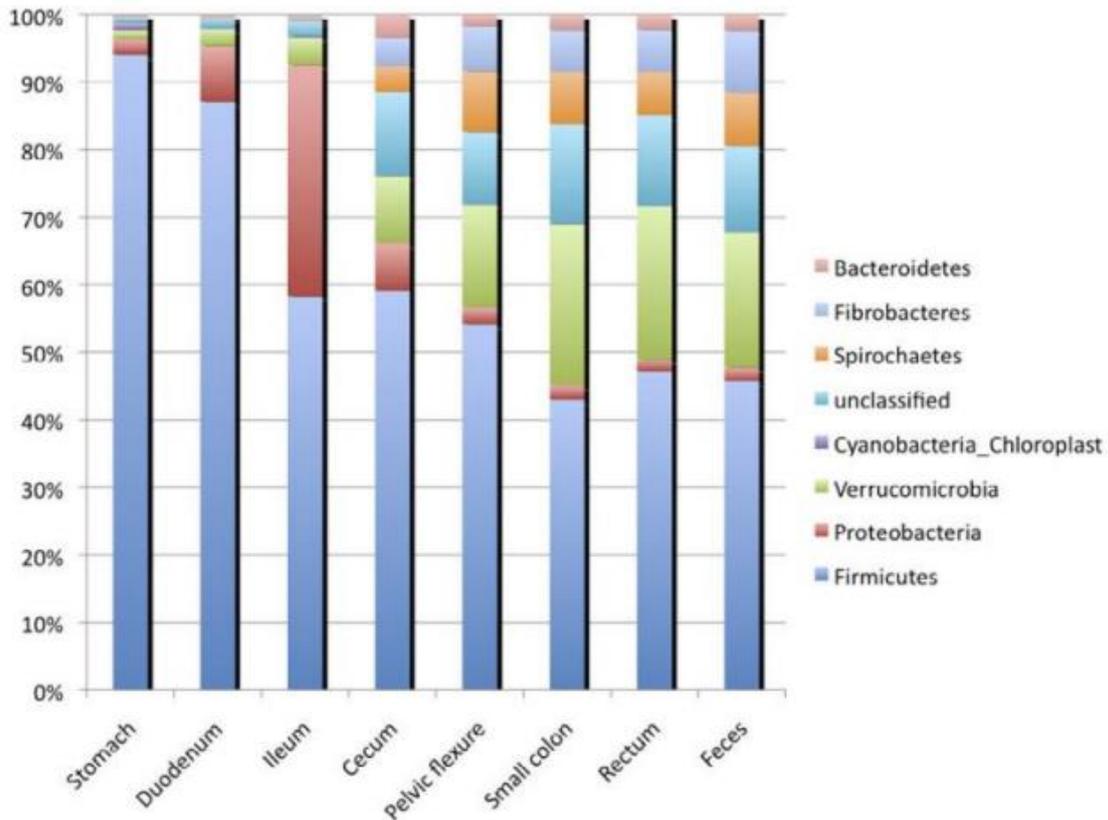


Abb. 3: Relative Häufigkeit der wichtigsten Stämme im Magen-Darm-Trakt [14].

Hierbei wurde deutlich, dass der Stamm Firmicutes in allen Kompartimenten am häufigsten vertreten ist, besonders im Magen und Zwölffingerdarm. Große Mengen an Proteobakterien konnten im Ileum festgestellt werden. Auch im Zwölffingerdarm und Blinddarm waren ihre Anteile deutlich höher als in den übrigen Kompartimenten. Verrukomikroben dominierten vor allem im Dickdarm, Rektum und schließlich im Kot [14]. Spirochäten, Bacteroidetes und Fibrobakterien konnten ebenfalls nachgewiesen werden, allerdings war die Häufigkeit eher gering [14].

Der Stamm Firmicutes, welcher laut Costa *et al.* einen Großteil der Mikrobiota-Zusammensetzung in den einzelnen Kompartimenten ausmacht, wurde weiter in Klassen unterteilt [14]. Die nachfolgende Abbildung 4 gibt Aufschluss über die relative Häufigkeit dieser Klassen.

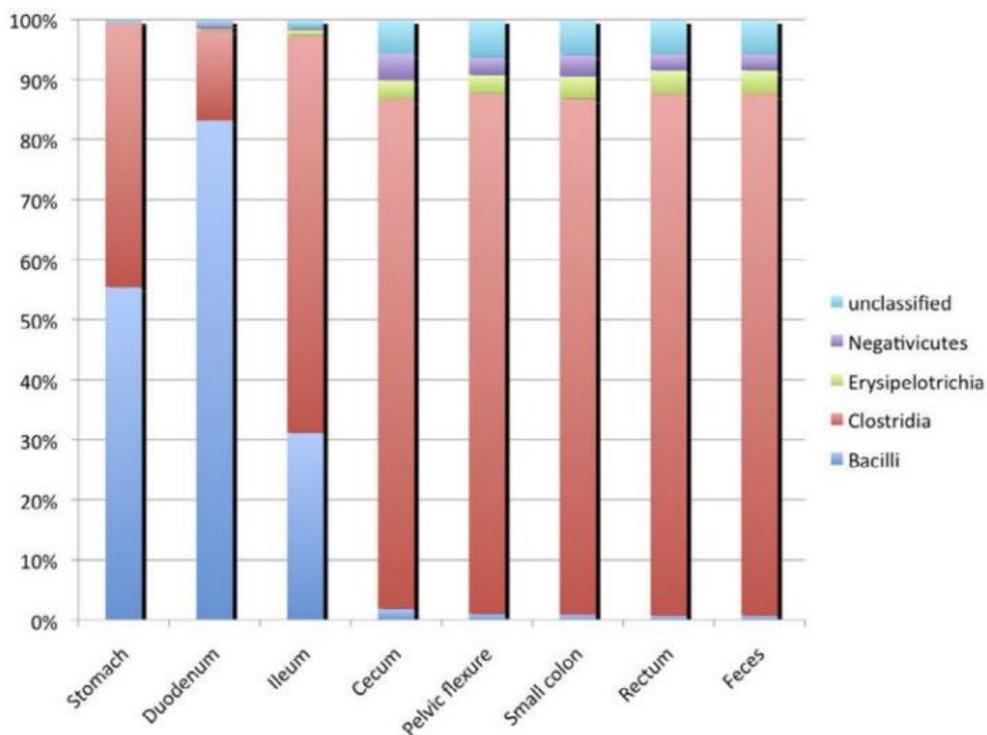


Abb. 4: Einteilung Stamm Firmicutes in den vorkommenden Klassen [14].

Die Bakterienklasse Clostridia war in fast jedem der verschiedenen Kompartimente dominant, dicht gefolgt von den Bacilli, welche allerdings nur in den vorderen Abschnitten des Magen-Darm-Trakts zu finden waren. Neben der kaum vorkommenden Klassen Negativicutes und Erysipelotrichia konnte ein geringer Anteil, welcher in jedem der Kompartimente vorkam, nicht klassifiziert werden [14].

Die Schleimhäute und auch das Lumen des gesamten Dünndarms beherbergt zwischen  $10^6$  und  $10^7$  lebensfähige Bakterien pro Milliliter (ml), die meisten von ihnen mit proteolytischer Aktivität. In diesem Bereich des Gastrointestinaltrakts sind ebenso *Candida*, *Clostridium* und *Staphylococcus* anzutreffen, jedoch ist die Anzahl im Vergleich zu den anderen Darmabschnitten geringer [14].

Pro Gramm aufgenommener Nahrung lassen sich im Blinddarm etwa  $10^9$  Bakterien nachweisen. Darunter besiedeln vor allem cellulolytische Bakterien, wie *Ruminococcus flavefaciens* und *Fibrobacter succinogenes*, den Blinddarm. Weiters enthält der Blinddarm amylolytische, glykolytische, hemicellulolytische und laktatfermentierende sowie proteolytische Bakterien. Einen besonders hohen Anteil davon bilden die proteolytischen Bakterien wie *Streptococcus lutetiensis*, *Streptococcus equinus* und Bacteroides. Dabei sollte erwähnt werden, dass die Proteinverdauung hauptsächlich im Dünndarm abläuft und daher nur rund 20 % der Bakteriengesamtzahl im Dickdarm proteolytisch sind [7].

Zu den bereits erwähnten Bakterien des Blinddarms kommen im Dickdarm zusätzlich *Butyrivibrio fibrisolvens* und *Clostridium barati* vor. Insgesamt beherbergt der Dickdarm zwischen  $10^5$  und  $10^8$  lebensfähige Bakterien pro ml [7]. Abbildung 5 gibt einen strukturierten Überblick über die daraus abzuleitende Kernmikrobiota des Pferdes. Zudem sind Protozoen beim Abbau von Hemizellulose und Pektinen behilflich, bei ihrer Eliminierung reduziert sich die Verdauung der Trockenmasse. Insgesamt befinden sich zwischen  $10^3$  und  $10^5$  Protozoen pro ml im Blind- und Dickdarm. Den Großteil davon machen die Gattungen *Blepharocorys*, *Buetschlia*, *Cycloposthium* und *Paraisotricha* aus [7].

In einer Studie von Schoster *et al.* wurden ebenfalls mikrobielle Populationen der verschiedenen Magen-Darm-Kompartimente untersucht und miteinander verglichen. Dabei wurde zwischen Zwölffingerdarm und Ileum sowie zwischen Ileum und Kot die größte Ähnlichkeit gemessen [15]. Zudem wiesen auch Proben aus Blinddarm und Kot hohe mikrobielle Ähnlichkeiten auf. Im Gegensatz dazu waren die Ähnlichkeiten zwischen Zwölffingerdarm und Dickdarm am geringsten. Bei Betrachtung des Ileums im Vergleich zu Blind- und Dickdarm konnten gleiche viele Ähnlichkeiten festgestellt werden [15]. Die begrenzte Ähnlichkeit zwischen den Kompartimenten mehrerer Pferde zeigt die Einzigartigkeit der Mikrobiota jeden Tieres. Auch im Vergleich der Magen-Darm-Kompartimente des gleichen Pferdes wird insgesamt durch die geringe Gemeinsamkeit der einzelnen Segmente eine große mikrobielle Vielfalt entlang des gesamten Magen-Darm-Trakts verdeutlicht [15].

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die Zusammensetzung benachbarter Kompartimente zwar Ähnlichkeiten aufwies, die Zusammensetzung der Bakterienpopulation zwischen den verschiedenen Magen-Darm-Abschnitten aber trotzdem stark variiert. Im Allgemeinen kann auch gesagt werden, dass die Bakterienvielfalt in distalen Bereichen des Magen-Darm-Trakts höher ist als im proximalen Abschnitt [14].

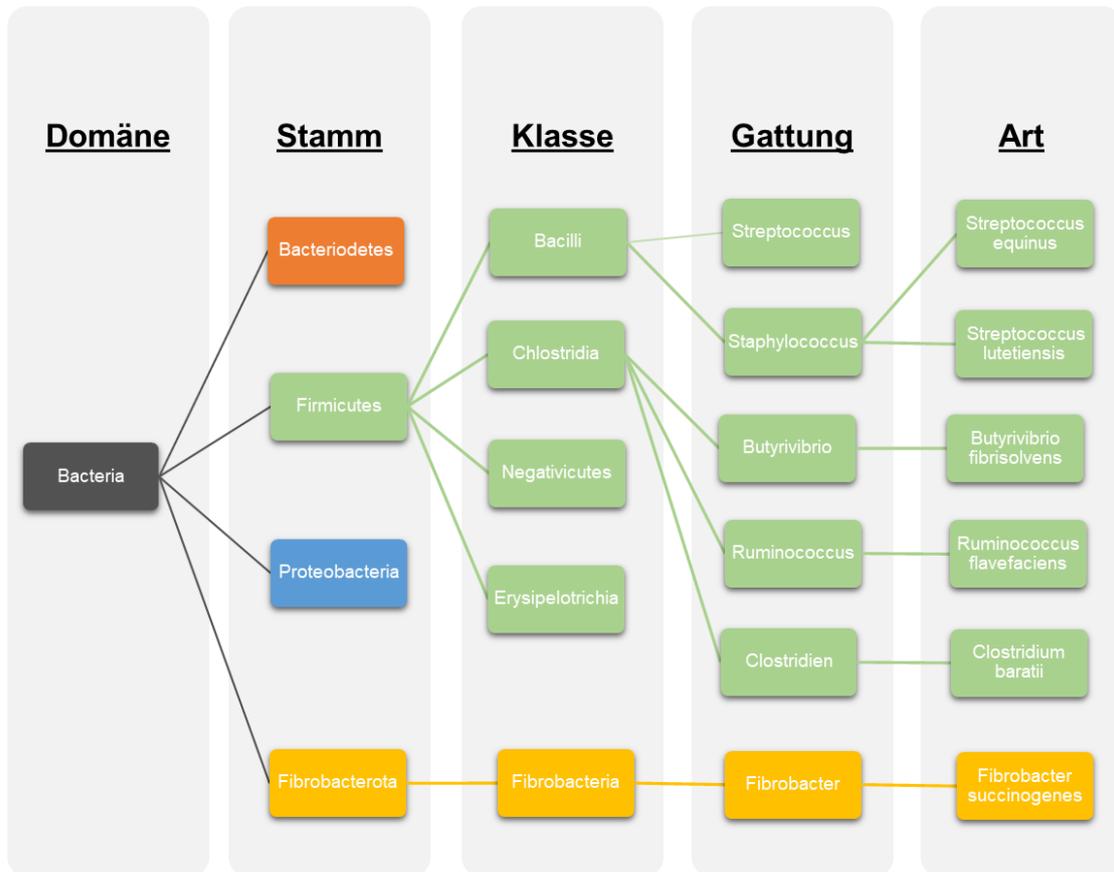


Abb. 5: Übersicht der Kernmikrobiota im Magen-Darm-Trakt von Pferden [Abb.: Jasmin Hasenöhr]

## 4 Einflüsse auf die equine Mikrobiota

Für Pferde ist ein reibungslos stattfindender Verdauungsprozess von großer Bedeutung. Besonders durch die mikrobielle Fermentation im Blind- und Dickdarm wird ein Großteil des Energiebedarfs zur Deckung der Erhaltung gewonnen. Für diesen Prozess beherbergt das Pferd ein großes Spektrum an verschiedenen Mikroorganismen, die sich je nach Magen-Darm-Segment unterscheiden und so für eine effiziente Nährstoffverwertung sorgen. Neben der Futtermittelverwertung erfüllt der Magen-Darm-Trakt des Pferdes noch weitere wichtige Funktionen oder ist zumindest daran beteiligt, wie zum Beispiel Immunhomöostase und Entzündungsprozesse [1].

Das Ökosystem des Gastrointestinaltrakts gilt als eines der komplexesten und wichtigsten mikrobiellen Systeme. Die Intaktheit und Aufrechterhaltung dieses Systems spielen eine bedeutende Rolle für die Gesundheit und das Wohlergehen des Pferdes [1].

Der equine Gastrointestinaltrakt ist anfällig für diverse Störungen durch unterschiedliche Stressfaktoren, welche die Verdauung sowie andere wichtige Funktionen des Magen-Darm-Trakts inklusive der Mikrobiota aus dem Gleichgewicht bringen können. Transportwege, Wettkämpfe, Bewegung oder das Absetzen eines Fohlens vom Muttertier zählen zu möglichen Stressauslösern. Als Folge dessen treten häufig bekannte Verdauungserkrankungen auf, dazu zählen vor allem Durchfall oder Kotwasser, Koliken und Magengeschwüre [1].

Des Weiteren wirken sich auch Medikamente (Anthelminthika, Anästhetika) sowie tierbezogene Faktoren (Rasse und Alter) auf die Mikrobiota aus. Eine überwiegend große Rolle spielt jedoch die Ernährung, da bereits kleine Abweichungen zu deutlichen Veränderungen der Mikrobiota führen können. Dabei sollte besonders auf den Gehalt von Stärke, Ballaststoffen und Fett geachtet werden [1].

Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit den Veränderungen der gastrointestinalen Mikrobiota unter Einfluss des Alters und der Ernährung.

## **4.1 Altersbedingte Einflüsse auf die equine Mikrobiota**

Die mikrobielle Besiedelung des Magen-Darm-Trakts von Pferden findet von der Geburt über die Entwöhnung bis zum adulten Alter und schließlich weiter bis in das hohe Alter statt und stellt in allen Lebensphasen einen dynamischen Prozess dar [1].

### **4.1.1 Die Mikrobiota der Neugeborenen und deren Entwicklung**

Bei Fohlen gilt die erste Lebenswoche als besonders kritisch. In dieser Zeit ist mit erhöhter Morbidität und Mortalität aufgrund von verschiedenen Erkrankungen, wie Atemwegserkrankungen oder Enteritiden zu rechnen. Deshalb ist eine optimale Zusammensetzung der Mikrobiota von Geburt an wichtig und in einem ausgewogenen Gleichgewicht zu halten. Nur durch regelmäßige Weiterentwicklung der Darmmikrobiota des Fohlens ist die Erreichung einer stabilen und vielfältigen Mikrobiota überhaupt möglich [1].

Da Neugeborene aus einer sterilen Umgebung kommen, findet die erste Besiedelung des Magen-Darm-Trakts durch den Kontakt mit vaginalen und perinealen Mikrobiota der Mutterstute während der Geburt statt. Durch diesen Erstkontakt mit Mikroorganismen kann im Mekonium des Fohlens bereits eine vielfältige Mikrobiota nachgewiesen werden [1].

Zusätzlich dazu besiedeln Bakterien der Haut, der Haare sowie der Umwelt ebenfalls den Gastrointestinaltrakt des Fohlens und konkurrieren untereinander. Da das junge Tier ein äußerst günstiges Milieu für Mikroben bereitstellt, ist die Mikrobiota im Vergleich zu älteren Artgenossen viel artenreicher und dynamischer [1].

Während das Fohlen wächst verändert sich auch die Mikrobiota, indem sie sich vor allem an neue Ernährungsbedürfnisse, wie zum Beispiel den Übergang von Stutenmilch auf Heu oder Gras anpasst [2].

Es konnte festgestellt werden, dass der Gastrointestinaltrakt von zwei Monate alten Fohlen bereits raufutterverdauende Bakterien enthält. Bis es allerdings soweit ist kommt es in Zusammensetzung und Reichtum der Darmmikrobiota zu unzähligen Veränderungen. Abbildung 6 zeigt, dass der Bakterienreichtum in den ersten 24 Stunden nach der Geburt rasant ansteigt und schließlich seinen Höhepunkt im Alter von sieben Tagen erreicht [1]. Der rasche Anstieg der Bakterien kurz nach der Geburt des Fohlens kann auf die Umweltexposition zurückzuführen sein. Das Fohlen kommt mit einer Vielzahl Umgebungsbakterien in Kontakt, wobei es sich bei den meisten nur um transiente Organismen handelt. Mütterliche Bakterien

können zudem dafür sorgen, dass die anfangs ohnehin sehr instabile und dynamische Mikrobiota des Fohlens auch große interindividuelle Unterschiede in der Zusammensetzung aufweist. In der Abbildung 6 ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass ein 24 Stunden altes Fohlen insgesamt mehrere Gattungen beherbergt, welche auch als Ursache für Neugeborenenroseptikose angesehen werden können [1].

Ähnlichkeiten in der bakteriellen Zusammensetzung zwischen Fohlen und Stute treten ca. sieben Tage nach der Geburt auf. Zu diesem Zeitpunkt ist vor allem der Stamm der Firmicutes anzutreffen. Die zunächst dominierenden Proteobakterien werden schrittweise durch Bacteroidetes und Fusobakterien ersetzt. Zu den überwiegend vorkommenden Gattungen zählen Bacteroidetes, Fusobacterium, *Tyzzellerella*, *Streptococcus* und *Lactobacillus* [1].

In einer Studie von Chaucheyras-Durand *et al.* konnte Bacteroidetes durch die Messung der Mikrobiota an mehreren Körperstellen der Mutter fast ausschließlich in der Vagina nachgewiesen werden [1]. Dieses Ergebnis zeigt nicht nur die bedeutende Rolle des vaginalen Ökosystems als Quelle für Mikroben, sondern die Möglichkeit, mütterliche Prägung auch eine Woche nach der Geburt noch nachweisen zu können. Ernährt sich das Fohlen über das Kraftfutter der Mutter führt dies ebenso zu einem deutlichen Bacteroidetes-Anstieg [1].

Neben festen Nahrungsbestandteilen spielt auch die Stutenmilch eine wichtige Rolle für die mikrobielle Zusammensetzung im Fohlendarm, indem sie die schleimhautschützende Wirkung der Oligosaccharide begünstigt und Bakterien überträgt [1].

Mit der Zeit reift das Ökosystem des Magen-Darm-Trakts des Fohlens heran bis es schließlich bereit ist, feste Nahrungsbestandteile selbständig abzubauen zu können. Dieser Prozess ist besonders für das künftige Absetzen des Fohlens von großer Bedeutung [1].

Während des Absetzens finden einige Veränderungen im sozialen Umfeld und der Futterzusammensetzung sowie Fressverhalten des jungen Pferdes statt. Diese und noch weitere stressbedingte Veränderungen wirken sich direkt auf das Verhältnis der Darmbakterien aus. Die Beziehung zwischen der Mikrobiota und der Darmschleimhaut wird dadurch gestört und infolgedessen bricht das Gleichgewicht der Darmmikrobiota des Fohlens zusammen. Zusätzlich regt der Entwöhnungsstress die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse an, welche Stresshormone in Form von Katecholaminen und Glukokortikoiden freisetzt [1].

Dem aktuellen Wissenstand nach ist zudem bekannt, dass es je nach Entwöhnungsstrategie – progressiv oder abrupt – Unterschiede im Vorkommen einiger Bakterien gibt. Beispielsweise sinkt bei fortschreitender Entwöhnungsphase die relative Häufigkeit der Familie

Prevotellaceae und der Gattung *Ruminococcus* im Vergleich zur abrupten Entwöhnung. Wiederum umgekehrt verzeichnet die progressive Entwöhnung eine Steigerung der anaeroben Pilzbesiedelung im Gegensatz zur plötzlichen Entwöhnung [1].

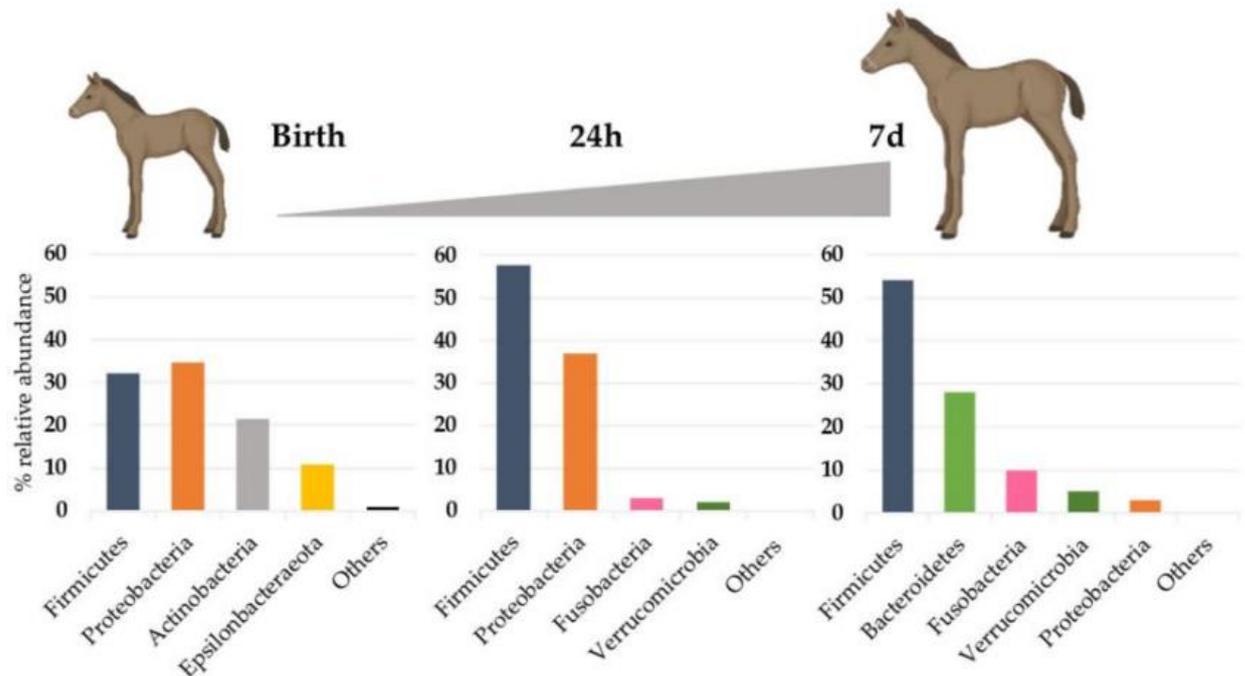


Abb. 6: Entwicklung der Bakterienstämme in den Faeces von Fohlen von der Geburt bis zum siebten Lebenstag [1].

Costa *et al.* untersuchten die mikrobielle Entwicklung bei Fohlen. Alle Ergebnisse sind im nachfolgenden Diagramm (Abb. 7) abgebildet und zeigen auf dem ersten Blick deutlich, dass Firmicutes in allen Altersgruppen den Hauptstamm bilden [16]. Des Weiteren weisen neugeborene Fohlen einen höheren Anteil an Acidobakterien im Vergleich zu heranwachsenden Tieren auf. Interessant ist auch, dass Chlamydiae vor allem bei Fohlen im Alter von 31-60 Tagen vorkommen. Außerdem findet nach dem anfangs sinkenden Anteil von Proteobakterien wieder eine leichte Steigerung ab dem 180. Lebenstag statt [16].

Ähnlichkeiten der bakteriellen Zusammensetzungen zwischen heranwachsenden und adulten Pferden treten vor allem im letzten Drittel der Wachstumsphase auf [16].

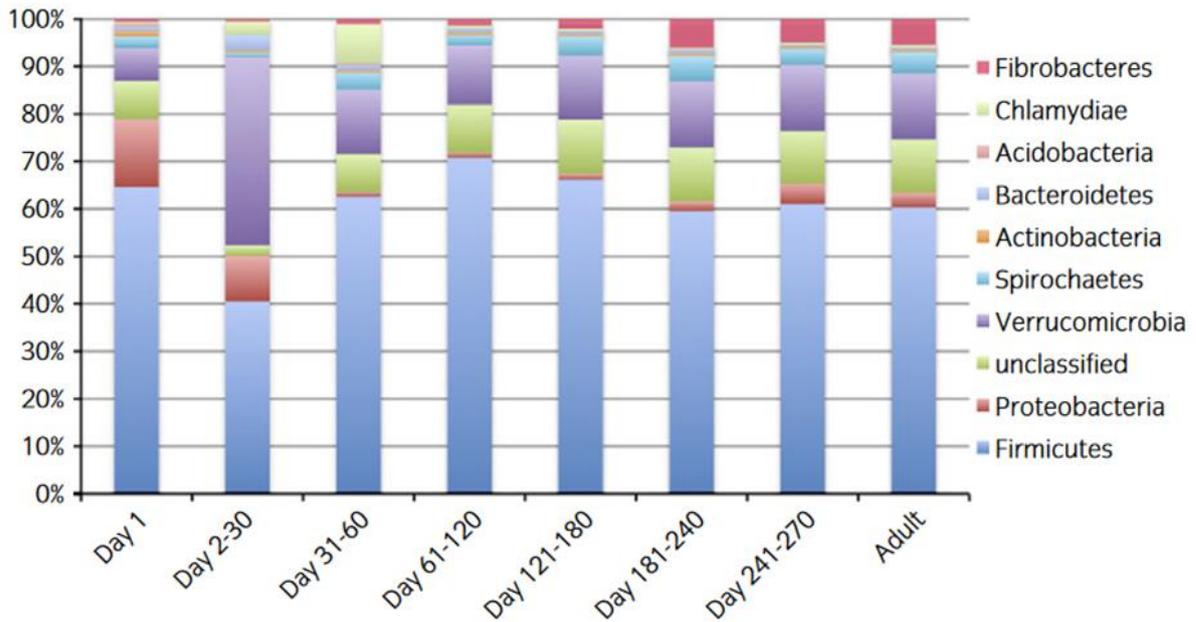


Abb. 7: Relative Häufigkeit von Bakterienstämmen in den Faeces verschiedener Altersgruppen ab der Geburt (= Day 1) [16].

Für einen detaillierteren Einblick sorgt die Abbildung 8, in der nun die vorkommenden Bakteriengattungen abgebildet sind. Im Vergleich zu den vorher angeführten Stämmen zeigen die Gattungen deutliche Unterschiede in jeder der einzelnen Altersgruppen [16].

Im Allgemeinen besitzen Fohlen der Altersgruppen von 2-30 und 31-60 Tagen eine weit geringere Diversität der Mikrobiota als andere Altersgruppen. Neben den Gattungen *Acinetobacter*, *Akkermansia*, *Treponema*, *Lactobacillus* und *Sporobacter* konnten einige andere Gattungen nicht bestimmt werden. Einer der bedeutendsten Unterschiede zeigt sich bei Fohlen im Alter von 2-30 Tagen, denn in dieser Altersgruppe ist die relative Häufigkeit der *Akkermansia* am höchsten und die der Clostridiales am geringsten, während sie in den anderen Altersgruppen ungefähr gleich hoch ist [16].

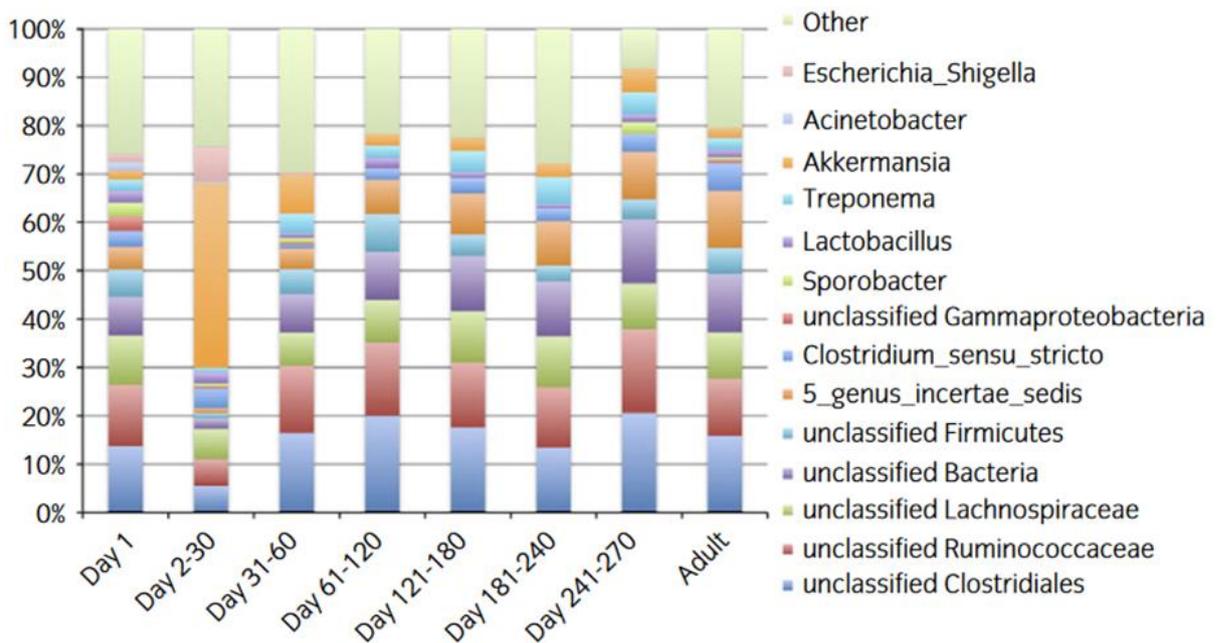


Abb. 8: Relative Häufigkeit von Bakteriengattungen in den Faeces verschiedener Altersgruppen ab der Geburt (= Day 1) [16].

Trotz der anfänglichen Unterschiede zeigt sich ca. ab dem 60. Lebenstag ein ähnliches Bakterienmuster wie bei älteren Altersgruppen bis hin zu den adulten Pferden. Auf der Stammesebene betrachtet ist die relative Häufigkeit der Firmicutes, Verrukomikroben und der nicht klassifizierten Bakterien fast ident [16]. Das bedeutet, dass Fohlen im Alter von 60 Tagen nahezu 90 % der gleichen Bakterien im Gastrointestinaltrakt beherbergen wie ausgewachsene Pferde. Einen erstaunlichen Anteil davon macht der Stamm der Firmicutes aus [16].

#### 4.1.2 Altersbedingte Veränderungen der Mikrobiota

Die Altersbestimmung von Tieren kann auf mehrere Arten erfolgen. Dazu gehört zum Beispiel die Einstufung des physiologischen oder funktionellen Alters und des chronischen Alters, wobei das physiologische Alter von Genetik, Nutzung sowie Umweltbedingungen abhängig ist und daher stark zwischen den Tieren variieren kann [17]. Trotz fortschreitender Forschung ist es noch nicht möglich den Zeitpunkt der Reife eines Pferdes genau zu bestimmen. Des Weiteren ist es ebenfalls nicht möglich den Zeitpunkt, an dem ein Pferd als alt gilt zu definieren. Grund dafür ist der immer fortwährende und zeitübergreifende Prozess des Alterns, der durch die Umwelt sowie die Rasse beschränkt wird [17].

Vollständig körperlich und geistig entwickelte Pferde werden als „reif“ bezeichnet und sind in der Regel Tiere ab dem fünften Lebensjahr. Mit diesem Alter besitzen alle Rassen ein vollständig entwickeltes Skelett und Gebiss sowie alle grundlegenden Muskelgruppen und sind fähig, während verschiedener Bewegungsabläufe das Gleichgewicht zu halten [17]. Wie im vorhergehenden Kapitel deutlich wurde, ist ein Ausreifen der gastrointestinalen Mikrobiota schon deutlich früher, nämlich ab einem Alter von 60 Tagen erreicht [16].

Mit dem Erreichen des 15. Lebensjahres werden (Warmblut-)Pferde als gealtert und ab dem 30. Jahr oder älter als sehr alt beschrieben, dabei sollte jedoch auch der physiologische Status jeden Tieres beachtet werden. Altersbedingte Veränderungen treten bei Pferden häufig ab einem Alter von 15 Jahren auf. Im Allgemeinen nimmt die körperliche Kraft ab, die Muskelmasse schwindet und die Bewegungen werden deutlich langsamer. Besonders bemerkenswert sind jedoch Veränderungen des Gebisses und die dadurch erschwerten Kaubewegungen, welche zu einer gestörten Nahrungsaufnahme führen und altersbedingte Stoffwechselstörungen mit sich bringen [17]. Altersbedingte Veränderungen in der Nahrungsaufnahme und -zusammensetzung könnten aber auch einen direkten Einfluss auf die intestinale Mikrobiota haben.

Basierend auf Untersuchungen der Mikrobiota von adulten sowie alten Pferden war zwar ein Abfall des Bakterienreichtums zu erkennen, allerdings konnten kaum Unterschiede in der Zusammensetzung nachgewiesen werden [1]. Bei alten Pferden scheint eine erhöhte relative Häufigkeit der Proteobakterien und eine verringerte Häufigkeit von Fibrobacteres im Vergleich zu Tieren im Erwachsenenalter vorzukommen. Trotz all dem sind die bisherigen Daten zum Einfluss des Alters auf die Magen-Darm-Mikrobiota bei Pferden jedoch noch sehr unvollständig [1].

Morrison *et al.* untersuchten anhand der Faeces von 23 Ponystuten den Einfluss des Alters auf die Mikrobiota während des Umstiegs von einer heubasierten auf eine stärkereiche Ernährung. Elf dieser Stuten waren 19 Jahre alt oder älter, die restlichen zwölf bildeten mit 5-15 Jahren eine Kontrollgruppe [13]. Die Ergebnisse zeigen, dass das Alter die bakterielle Vielfalt nicht beeinflusst. Als einziger Unterschied wurde ein höherer Anteil der Propionat produzierenden Gattung *Barnesiella* in der Kontrollgruppe vermerkt. Im Gegensatz dazu konnten jedoch bei beiden Altersgruppen Veränderungen nach der Zufuhr von stärkereichem Futter in Form von Gerste festgestellt werden [13]. So stiegen die relativen Häufigkeiten von *Candidatus Saccharibacteria* und Firmicutes an, während sich die relative Häufigkeit von

*Fibrobacteres* signifikant reduzierte. Des Weiteren konnte mit Einführung der Gerste ein bedeutender Anstieg an *Streptococcus* festgestellt werden [13].

Eine stärkehaltige Ernährung führt dazu, dass faserabbauende Bakterien reduziert werden und säuretolerante Arten wie *Streptococcus* und *Lactobacillus* ansteigen, damit die erhöhte Stärkezufuhr verdaut werden kann [13]. Oft muss die Fütterung von Pferden dem Alter und den damit verbundenen physiologischen Veränderungen angepasst werden. Die erkennbaren Unterschiede in der mikrobiellen Zusammensetzung sind daher weniger alters- als fütterungsbedingt [13].

## 4.2 Ernährungsbedingte Einflüsse auf die equine Mikrobiota

Bei der Nahrungsaufnahme gelangen Bestandteile, welche im Vorderdarm nicht enzymatisch verdaut werden konnten, weiter in den Hinterdarm und wirken sich so auf das vorhandene Mikrobiom aus. Sogenannte Zellwandkohlenhydrate, darunter fallen Cellulose, Hemicellulose und Pektine, kommen zu 35-60 % in der Nahrung des Pferdes vor und können nur durch mikrobielle Enzyme im Enddarm abgebaut werden [18].

Nahrungsstärke und wasserlösliche Kohlenhydrate machen einen Anteil von 10-40 % der Nahrung aus, welcher nicht vollständig im Vorderdarm verdaut werden kann. Grund dafür kann die Beschaffenheit der Getreidekörner oder fehlende Amylase sein. Der anschließende Abbau im Hinterdarm findet einerseits durch die Hydrolyse der Polysaccharide, andererseits durch die Fermentation der Einfachzucker statt [18].

Abbildung 9 veranschaulicht die Wege der Hydrolyse pflanzlicher Polysaccharide und die daraus entstehenden Endprodukte. Durch die Anheftung der Mikroorganismen an den Pflanzenzellwänden werden Enzyme an den Substraten aktiv und lösen damit die Hydrolyse der Polysaccharide aus. Für den Zellwand- und Stärkeabbau sind vorwiegend Enzyme zuständig, die sich an Partikeln im Blind- und Dickdarminhalt befinden [18].

Besonders wichtig für den Zellwandabbau sind Bakterien der Gattungen *Ruminococcus* und *Fibrobacter* sowie Pilzarten der Gattung *Piromyces*. Des Weiteren sind amylolytische Bakterienarten der Gattungen *Streptococcus* und *Lactobacillus* häufig im Hinterdarm des Pferdes zu finden. Aufgrund fibrolytischer und amylolytischer Bakterien werden Kohlenhydrate zu Einfachzuckern wie Glucose oder Xylose gespalten und sind somit für die weitere Verdauung von Nutzen [18]. Als Endergebnisse der Fermentation liegen SCFA, Laktat und

Gase in Form von Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) vor. Laktat wird von bestimmten Bakterien in SCFA, vor allem Propionat, umgewandelt [18].

Die Zusammensetzung der SCFA wird einerseits durch die Art der Pflanzenkohlenhydrate und andererseits durch die Mikrobiota bestimmt. Mikroorganismen mit fibrolytischer Aktivität sorgen für große Mengen Acetat und zu einem geringen Teil auch Butyrat, während amylolytische Mikroorganismen einen hohen Anteil an Propionat bilden [18]. Doch auch umgekehrt kann die Zusammensetzung der Nahrung die Mikrobiota beeinflussen.

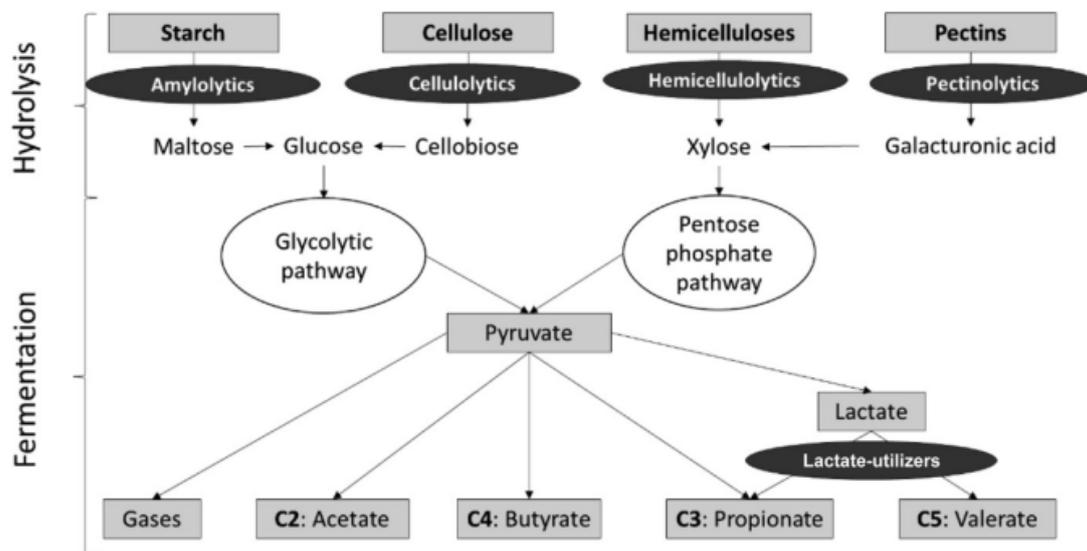


Abb. 9: Wege der Hydrolyse pflanzlicher Polysaccharide im Dickdarm [18].

#### 4.2.1 Auswirkungen der Rationszusammensetzung

Die Ernährung von Pferden in Menschenhand hat häufig kaum mehr Ähnlichkeit mit der physiologischen grasenden Ernährungsweise des Wildpferdes. Die Umstellung auf Futtermittel mit hohem Gehalt an Stärke oder Zucker bewirkt deutliche Veränderungen in der Bakterienzusammensetzung [10, 13].

Heu als Alleinfuttermittel enthält weniger Nährstoffe und wird langsam abgebaut, während beispielsweise Heu-Hafer-Rationen viele Nährstoffe enthalten, welche schneller abgebaut werden und dadurch ein hohes Maß an einer mikrobiell stabilen Vielfalt voraussetzen. Sind allerdings zu viele Nährstoffe verfügbar, sinkt die mikrobielle Vielfalt, die Stabilität der Mikrobiota schwankt und eine Dysbiose entsteht [2].

Um ein Verständnis über die Auswirkungen einer grasbasierten Fütterung zu erlangen, untersuchten Daly *et al.* zum einen Proben von Dickdarminhalten aus sechs Pferden, welche alle freien Zugang zu Weidegras hatten (Gruppe 1) und zum anderen Proben von Dickdarminhalten von zwölf Pferden, welche für leichte Arbeit eingesetzt wurden und mit zucker- und stärkehaltigem Kraftfutter gefüttert wurden (Gruppe 2 und 3). Pferde der Gruppe 2 wurden aufgrund von Gliedmaßenverletzungen und Pferde der Gruppe 3 aufgrund von Dickdarmerkrankungen eingeschläfert [9]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Populationsgröße der Bacteroidetes bei grasgefütterten Pferden mit 13,5 % geringer war als bei Pferden, die Kraftfutter (24,7 % und 27,7 % bei Darmerkrankung) bekamen. Umgekehrt wurden 2,7 % Fibrobacterbakterien bei Gruppe 1 und 0,4 – 0,5 % bei Gruppe 2 und 3 nachgewiesen. Auch die Populationsgröße der Ruminococcaceae war bei den Kraftfutter-Gruppen mit 0,2 % und 0,01 % deutlich geringer als bei Pferden mit Grasfütterung (1,4 %). Im Vergleich der Spirochaetaceae war der Anteil in allen drei Gruppen sehr ähnlich [9].

Dazu passend untersuchten Langner *et al.* die Veränderungen in der fäkalen Mikrobiota von 29 Pferden und 30 Ponys mit einem Durchschnittsalter von zehn (Pferde) und sechs (Ponys) Jahren während eines zweijährigen Programms, in dem eine Gewichtszunahme durch erhöhte Energiezufuhr in Form von Kraftfutter erzielt wurde. Hierfür wurde Faeces nach fünf (t1) und zwölf (t2) Monaten sowie zwei Jahren (t3) ab Studienbeginn gesammelt und untersucht [19]. Zwischen der ersten und zweiten Probenentnahme wurde die zugeführte Energie verdoppelt, indem Futterrationen aus 60 % Heu und 40 % Kraftfutter gefüttert wurden. Mit nahezu 60 % war Firmicutes der größte vorkommende Stamm gefolgt von Bacteroidetes (36,5 %), Spirochetes (2,46 %), Fibrobacteres (1,18 %) und Proteobakterien (0,69 %) [19].

Während der Studiendauer konnten zwischen den unterschiedlichen Probeentnahmezeitpunkten mikrobielle Veränderungen festgestellt werden. Im Zeitraum zwischen t1 und t2 gab es bei den Pferden einen Abfall der relativen Häufigkeit von Fibrobacteres, parallel dazu wurde eine erhöhte Anzahl an Proteobakterien in den Faeces der Ponys nachgewiesen. Zwischen t2 und t3 nahm der Stamm der Firmicutes trotz unveränderter Energiezufuhr nur bei den Ponys deutlich zu [19].

Bei einer stärkebasierten Fütterung wird ein Großteil der Menge nicht im Vorderdarm verdaut, sondern gelangt unberührt in den Hinterdarm des Pferdes. Durch die Fermentation der Stärke im Hinterdarm wird Milchsäure in großen Mengen gebildet, wodurch der pH-Wert sinkt [2]. Ein niedriger pH-Wert im Dickdarm stellt ungünstige Bedingungen für notwendige und

säureunverträgliche Bakterien dar, was das Risiko für Krankheiten erhöht [2]. Abgesehen von der generellen Aufnahme hoher Stärkemengen spielt dabei auch die Stärkequelle *per se* eine bedeutende Rolle bezüglich der Auswirkung auf die Mikrobiota. Im Fall von Hafer kommt es zum Beispiel zur Steigerung der Laktobazillen und zur Verminderung grampositiver Kokken, umgekehrt findet diese Beobachtung bei der Fütterung von Mais statt [2].

Besonders bei der Fütterung von Gerste kommt es zu einer Erniedrigung des pH-Wertes und zu einer erhöhten Ansammlung von *Streptococcus spp.*, die für die Produktion von Laktat verantwortlich sind [10, 13]. Außerdem zeigte sich nach der Fütterung von Gerste ein deutlicher Anstieg der Häufigkeit von Firmicutes und eine Verringerung des Bakterienstammes Fibrobacteres [1]. Mögliche Gründe für die Unterschiede können Abweichungen im Verhältnis von Amylose zu Amylopektin, aber auch die unterschiedliche Morphologie der Körner sein [2]. Zudem ist bekannt, dass auch die Getreideform und -verarbeitung einen kleinen Einfluss auf die Magen-Darm-Mikrobiota eines Pferdes haben kann. Dabei sind thermomechanische Prozesse, beispielsweise die Erzeugung von Pellets, im Gegensatz zu mechanischen Prozessen, wie Mahlen, vorteilhaft, weil sie die negativen Auswirkungen von Stärke auf die Aktivität im Dickdarm beschränken können [18].

Die Ernährung ist somit einer der wichtigsten Faktoren in Bezug auf Veränderungen der Mikrobiota. Stärkereiche Futterrationen wirken sich aber nicht nur auf die Mikrobiota, sondern auch auf das Verhalten des Pferdes aus [2]. Bei stärkereich gefütterten Ponys konnten Taktunreinheiten und häufigere Tempowechsel vermerkt werden [1].

Diese Verhaltensänderungen sind oft durch erhöhten Stress gekennzeichnet und können genutzt werden, um negative Auswirkungen oder Erkrankungen des Magen-Darm-Trakts durch eine Anpassung des Ernährungsmanagements zu mindern oder gar zu vermeiden [2].

#### **4.2.2 Fütterungszeiten und Futterentzug**

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf die Darmmikrobiota ist die Häufigkeit der angebotenen Mahlzeiten. Es sind zwar keine Unterschiede im Reichtum der Bakterienarten zu erkennen, jedoch aber in der relativen Häufigkeit [18]. Pferde, die zwei bis drei Mahlzeiten am Tag bekommen, weisen eine andere Zusammensetzung auf als Pferde, die die gleiche Menge einmal täglich bekommen. Die Unterschiede zeigen sich auf Gattungsebene in einer verringerten relativen Häufigkeit von *Prevotella*, *Lactobacillus*, *Streptococcus* und *Coprococcus* [1].

Nicht nur die Portionierung der Mahlzeit hat einen bedeutenden Einfluss, sondern auch Futterentzug. Die Mikrobengemeinschaft im Blind- und Dickdarm fördert die Futtermitteldigestion und dient als Schutz vor eindringenden Krankheitserregern. Zudem begünstigt sie auch die Immunantwort sowie die Integrität des Darmepithels. Futterentzug oder Fasten gelten als Störfaktoren, welche die Mikrobiota mit all ihren Funktionen behindern können [20].

Durch das Zurückhalten des Futters können Veränderungen im Magen-Darm-Trakt beobachtet werden. Dafür verglichen Willette *et al.* die fäkale Mikrobiota von gesunden Stuten, welche entweder freien Zugang zu Futter hatten oder denen Futter bewusst entzogen wurde.

So konnte bei Stuten, denen das Futter für 24 Stunden vorenthalten wurde, eine Steigerung der Bacteroidetes sowie nicht klassifizierter Bakterien und *Christensenella*, die dem Stamm der Firmicutes angehören, gezeigt werden [20].

Im Gegensatz dazu konnte bei Pferden mit uneingeschränktem Futterzugang keine Unterschiede in den zuvor erwähnten Gattungen festgestellt werden [20]. Des Weiteren gab es eine Abnahme einiger Firmicutesarten, wie nicht klassifizierte *Veillonellaceae* und *Bulleidia* sowie von Proteobakterien und Bacteroidetes bei nicht gefütterten Pferden, jedoch aber zu einem späteren Zeitpunkt. Die Gruppe, welche jederzeit Zugang zu Futter hatte, blieb die Bakterienzusammensetzung erneut unverändert [20]. Nach einem Futterentzug normalisiert sich die Vielfalt und Zusammensetzung der Mikrobiota in der Regel 18-24 Stunden nach der ersten Nahrungsaufnahme. Bei einer langanhaltenden Fastenzeit sind bestimmte Populationen durch energiesparende Anpassungsmechanismen in der Lage, dem Wirt das Überleben ohne Futter zu erleichtern [20].

#### 4.2.3 Probiotika und Präbiotika

Probiotika werden der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen nach als lebende Mikroorganismen, die sich in genügender Menge positiv auf die mikrobielle Gesundheit des Wirts auswirken, bezeichnet [2]. Wichtig dabei ist, dass nicht alle Mikroorganismen probiotische Wirkungen haben und somit erst auf ihre Eignung für probiotische Wirkungen getestet werden müssen. Zu den wünschenswerten Eigenschaften zählen die Haftungsfähigkeit an Schleim und Epithelzellen sowie die Überlebensfähigkeit im Magen-Darm-Milieu [21]. Zu den Wirkungsmechanismen von Probiotika gehören die Modulation des Immunsystems, die Inaktivierung von Toxinen, die Produktion antimikrobieller Substanzen und die Verdrängung krankheitsbildender Mikroorganismen [15]. Probiotika stärken die epitheliale Barriere und fördern die Schleimproduktion im Darm, dadurch wird das

Eindringen der Pathogene erschwert. Stämme mit probiotischen Eigenschaften heften sich an Epithelzellen an, wodurch Krankheitserreger nicht mehr in der Lage sind, Epithelzellen zu besiedeln. Zudem erschweren probiotische Stämme das Überleben eingedrungener Krankheitserreger im Magen-Darm-Lumen, in dem sie dafür notwendige Nährstoffe fernhalten [21].

Pferde sind häufig von Dickdarmerkrankungen betroffen, daher ist es wichtig, dass das Probiotika die Wirkung überwiegend im Blind- und Dickdarm entfaltet. Es wurde festgestellt, dass die Gattungen *Lactobacillus spp.*, *Bifidobacterium spp.* und *Enterococcus spp.* einen Großteil handelsüblicher Probiotika ausmachen, im Dickdarm von gesunden Pferden jedoch nur einen sehr geringen Anteil mit einer relativen Häufigkeit unter 1 % der Dickdarm-Mikrobiota ausmachen [21].

Firmicutes bilden den größten Stamm im Gastrointestinaltrakts des Pferdes. Dazu zählen die Klasse der Clostridien, welche positiv mit der equinen Magen-Darm-Gesundheit in Verbindung gebracht werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Wirkung der Clostridien vielversprechender sein könnte, als die der momentan verwendeten Stämme. Allerdings fehlen Studien dazu, um die erfolgreichere Wirkung der Klassenmitglieder zu belegen [21].

Trotz widersprüchlicher Ergebnisse in Bezug auf die Wirkung werden Probiotika gerne in großen Umfang in der Pferdefütterung, besonders bei stärkereicher Fütterung, eingesetzt. Dazu gehören üblicherweise Hefen und Bakterien, welche dabei helfen sollen, die Aktivitäten der Magen-Darm-Mikrobiota zu regulieren [2].

In Bezug auf die richtige Dosierung in Zusammenhang mit tierbezogenen Faktoren, wie Alter, Rasse oder Haltung sind weitere Forschungen dringend notwendig. Besonders das Alter kann eine bedeutende Rolle für den Einsatz von Probiotika spielen, weil die Wirkung auf die noch unreife Fohlen-Mikrobiota anders ausfallen könnte als auf die weniger dynamische Mikrobiota eines adulten Pferdes [2]. Da über 60 % aller Fohlen in den ersten sechs Lebenswochen Durchfall bekommen, ist gerade hier die Gabe von Probiotika eine wichtige Option [15]. Mehrere Untersuchungen bezüglich des Auftretens von Durchfall bei Fohlen fanden bereits statt, wobei einige Ergebnisse Vorteile in der Verabreichung von Probiotika zeigten, während andere Studien keine bedeutenden Unterschiede vermerkten [2,22,23]. Grund dafür könnte die begrenzte Wirkung der verwendeten Multistamm-Laktobazillen auf die Mikrobiota sein, was bedeuten könnte, dass lebende Bakterien als Probiotika nicht dazu fähig sind, Durchfall bei Fohlen zu verhindern [24].

Garber *et al.* berichten zudem von einer reduzierten Kotausscheidung bei Pferden mit Salmonellose nach der Gabe von Probiotika [2]. Für Schoster *et al.* war die Wirkung von

Probiotika auf Salmonellenausscheidung bisher jedoch enttäuschend, da durch die Gabe keine Unterschiede zu erkennen waren [15].

Präbiotika werden als von Wirtsmikroorganismen genutztes Substrat mit gesundheitlichem Nutzen definiert [2]. Zu den Vertretern in der Tierernährung gehören beispielsweise Oligofruktose und Inulin. Ihre Funktion liegt u.a. darin, die altersbedingte Verschlechterung der Verdauung zu mildern und bei plötzlicher Stärkezufuhr, beispielsweise in Form von Gerste, mikrobielle Magen-Darm-Störungen zu verringern. Auch hier sind – ähnlich wie bei Probiotika – widersprüchliche Ergebnisse zur Wirkung bekannt [2].

## 5 Diskussion

In dieser Arbeit wurde der aktuelle Wissenstand über die Mikrobiota im Gastrointestinaltrakt des Pferdes analysiert und unter Berücksichtigung der anatomischen und physiologischen Grundlagen des Magen-Darm-Trakts auf alters- und ernährungsbedingte Auswirkungen auf die Mikrobiota eingegangen. Diese Arbeit beruht auf einer umfangreichen Literaturrecherche, in der es Einschränkungen zu beachten gibt. Dazu zählen beispielsweise Unterschiede in den verschiedenen Studien hinsichtlich Material und Methoden, Stichprobengrößen sowie verwendete Messtechniken zur Charakterisierung der Mikrobiota. Zusätzlich können Sprachbarrieren entstehen, weil nur deutsch- und englischsprachige Literatur für die Erstellung dieser Arbeit herangezogen wurde. Es ist wichtig, die Einschränkungen der Literaturrecherche anzuerkennen und ihre Auswirkungen auf die Interpretation der Ergebnisse angemessen zu berücksichtigen.

Die equine Mikrobiota ist mit all ihren Aufgaben und Funktionen unentbehrlich für die Existenz des Pferdes. Wie bereits der Titel der Arbeit verrät, bezieht sich diese Arbeit besonders auf die Auswirkungen bestimmter Einflüsse. Dabei handelt es sich um altersbedingte Veränderungen der Mikrobiota, welche in enger Verbindung mit Änderungen im Ernährungsmanagement stehen.

Werden die wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Studien noch einmal genauer betrachtet, so fallen zwischen den verschiedenen Arbeitsgruppen Unstimmigkeiten in Bezug auf die Kernmikrobiota auf. Kauter *et al.* und Costa *et al.* stellten Firmicutes als überwiegend vorkommenden Stamm fest, während in der Studie von Morrison *et al.* der Stamm der Bacteroidetes den Großteil ausmacht [11,13,14]. Auch bei den Proteobakterien und Verrucomikroben sind sich Kauter *et al.* und Costa *et al.* einig, Morrison *et al.* jedoch führt als zweitgrößten Stamm den der Firmicutes, gefolgt von den Fibrobacteres an [11,13,14]. Die verschiedenen Studiendesigns könnten ein Grund für die abweichenden Ergebnisse sein. Interessant jedoch ist auch, dass es sich bei Costa *et al.* und Kauter *et al.* um vergleichsweise ältere Studien handelt, während Morrison *et al.* mit weiterentwickelten technischen Methoden möglicherweise einen Vorteil bei der Untersuchung der Mikrobiota hatte.

Im Vergleich der beiden Studien von Costa *et al.* und Schoster *et al.*, in denen es um die mikrobielle Besiedelung der einzelnen Magen-Darm-Kompartimente geht, fallen ebenfalls

Abweichungen der Ergebnisse auf. Allgemein betrachtet zeigen beide Studien, dass sich die Mikrobiota in den verschiedenen Kompartimenten unterscheidet. Schoster *et al.* berichten jedoch über große Ähnlichkeiten zwischen Zwölffingerdarm und Ileum sowie Ileum und Kot, welche allerdings von Costa *et al.* sowohl auf Gattungs- als auch auf Klassenebene nicht bestätigt werden [14,15]. Eine wichtige Erkenntnis von Schoster *et al.* ist, dass Kotproben nur geringe Ähnlichkeit mit den übrigen Abschnitten des Magen-Darm-Trakts haben, einzig der Blinddarm zeigte eine hohe Ähnlichkeit [15]. Bei Costa *et al.* ist diese Ähnlichkeit nur gering vorhanden [14]. Trotzdem zeigen beide Studien eine geringe mikrobielle Ähnlichkeit zwischen Zwölffingerdarm und Dickdarm. Zudem deuten Schoster *et al.* in der Studie bewusst auf die Einzigartigkeit und Vielfalt der Mikrobiota des Pferdes hin [15].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Mikrobiota des Pferdes sehr komplex ist und sich im Laufe des Lebens ständig weiterentwickelt. Aktuell gibt es in Bezug auf die Kernmikrobiota noch viel Forschungsbedarf, da ein Großteil der vorkommenden Bakterien noch nicht ausreichend klassifiziert und definiert ist [1].

Um den altersbedingten Einfluss aufzugreifen, wurden die Ergebnisse der Studien von Chaucheyras-Durand *et al.* und Costa *et al.* betrachtet, in denen es um die Entwicklung der Mikrobiota von Fohlen geht. Im Gegensatz zu Chaucheyras-Durand *et al.* untersuchten Costa *et al.* die Mikrobiotaentwicklung vom Fohlen bis zum adulten Pferd. Während Costa *et al.* auch in dieser Studie Firmicutes als Hauptstamm in allen untersuchten Altersgruppen vorfand, wurde in der Studie von Chaucheyras-Durand *et al.* ein höherer Anteil an Proteobakterien bei der Geburt gemessen [1,16]. Erst in den darauffolgenden 24 Stunden nach der Geburt stieg der Anteil der Firmicutes rasant an und bestätigt somit die Ergebnisse von Costa *et al.*, welche ebenfalls überwiegend Firmicutes bei Fohlen am ersten Lebenstag feststellten [1,16]. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Bakterienarten, welche den Firmicutes angehören, ist es nicht unüblich, dass dieser Stamm in der Mikrobiota der meisten Tierarten dominiert. Viele Firmicutesarten können mit dem Abbau von Ballaststoffen in Verbindung gebracht werden und sind daher bedeutend für die Magen-Darm-Gesundheit des Pferdes [16].

Obwohl Pferde erst ab dem fünften Lebensjahr als reif gelten, ist die Mikrobiota eines Fohlens bereits ab dem 60. Lebenstag in der mikrobiellen Zusammensetzung fast ident mit der Mikrobiota eines adulten Pferdes [16,20]. Das zeigt, dass das Alter bzw. der Alterungsprozess einen kaum Einfluss auf die Magen-Darm-Mikrobiota eines Pferdes hat [1,16].

Im Gegensatz zum Alterseinfluss gibt es deutlich mehr Daten über den Einfluss der Nahrung auf die Mikrobiota. Eine angepasste Ernährung ist für einen erfolgreichen Nährstoffabbau und

daraus folgend für die Gesundheit des Pferdes unerlässlich und kann bei falschem Einsatz zu Dysbiosen führen [11]. Vor allem eine Nahrungsumstellung auf zucker- und stärkehaltige Futtermittel macht sich in Hinblick auf die Bakterienzusammensetzung bemerkbar [13]. Chaucheyras-Durand *et al.* berichten vor allem nach der Gerstenfütterung von einem Anstieg des Firmicutes-Stammes und einem Abfall der relativen Häufigkeit von Fibrobacteres. Eine hohe Steigerung ist besonders bei der Gattung Streptococcus, welche dem Stamm der Firmicutes angehört, zu erkennen. Dieser Anstieg wird durch die stärke-tolerante Eigenschaft dieser Gattung erklärt, welche für die Verdauung des erhöhten Stärkegehalts notwendig ist [13]. Auch Daly *et al.* untersuchten den Einfluss der Gerstenfütterung auf die equine Mikrobiota. In der Studie wird die zuvor beschriebene Reduzierung der Fibrobacterbakterien ebenfalls gemessen [9]. Da das Ernährungsmanagement häufig dem Alter des Pferdes und den damit verbundenen physiologischen Veränderungen angepasst wird, ist anzunehmen, dass mögliche Veränderungen der Mikrobiota weniger alters- als ernährungsbedingt sind.

Da das Ziel dieser Arbeit hauptsächlich war, den aktuellen Wissenstand zu altersbedingten Besonderheiten der equinen Mikrobiota darzulegen, ist wichtig zu erwähnen, dass es im Zuge der Literaturrecherche besonders auffällig war, mehrere verschiedene Studien zur Entwicklung der Mikrobiota bei Fohlen, jedoch nur sehr wenige Daten zur Mikrobiota von adulten und insbesondere alten Pferden vorzufinden. Es bedarf somit dringend weiterer Studien zur Untersuchung der Mikrobiota von älteren Pferden, um den aktuellen Wissenstand zu erweitern.

Ein weiterer kurz erwähnter, dennoch wichtiger Einfluss ist die Gabe von Probiotika und Präbiotika. Über die tatsächliche Wirksamkeit der Probiotika wird lebhaft diskutiert. Während mehrere Studien positive Wirkungen verzeichnen konnten, wurden diese Ergebnisse von anderen Studien nicht bekräftigt [2,22,23]. Es ist zudem schwierig, die wenigen vorhandenen Studien aufgrund verschiedener Messungsgrundlagen zu vergleichen. Vor allem lässt sich die Wirkung eines Probiotikums bei erkrankten Tieren nicht aus Ergebnissen von Studien an gesunden Pferden ableiten.

Zukünftig sollte das bisher erlangte Wissen und der technologische Fortschritt genutzt werden, um weitere Forschungen in diesem umfangreichen Gebiet zu betreiben. Ferner ist es wichtig, ein tieferes Verständnis über die Zusammenhänge zwischen der equinen Mikrobiota im Gastrointestinaltrakt, dem Wohlbefinden und den auftretenden Krankheiten von Pferden zu

schaffen. Auch in Bezug auf die vielen verschiedenen Einflussfaktoren ist es notwendig, weitere aussagekräftige Informationen hervorzubringen.

Ein weiterer zukünftiger Meilenstein ist die fäkale Mikrobiota-Transplantation, welche zur Behandlung von Dysbiosen bzw. bakteriellen Infektionen mit Durchfall als Folge durchgeführt wird. Dabei werden Faeces eines vitalen Spenderpferdes in der Regel *per os* in den Darm eines Empfängers übertragen [21]. Bisher wurden bei diesem Vorgang noch keine unerwünschten Vorfälle gemeldet, jedoch ist die Weitergabe einer Krankheit vom Spender auf das Empfängertier nicht auszuschließen. In Zukunft sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, um die tatsächliche Wirkung von Stuhltransplantationen bei Pferden mit speziellen Magen-Darm-Erkrankungen oder Durchfall zu untersuchen und so die equine Mikrobiota nicht nur beschreiben, sondern auch therapeutisch nutzen zu können [25].

## 6 Fazit

Ziel der Literaturarbeit war die Bedeutung der Mikrobiota im equinen Gastrointestinaltrakt unter Berücksichtigung altersspezifischer und ernährungsbedingter Besonderheiten aufzuzeigen. Durch die in der Arbeit verwendete Literatur wurde klar, dass das Alter einen geringeren Einfluss auf die equine Mikrobiota hat als ursprünglich erwartet. Im Gegensatz dazu wird deutlich, dass eine Fütterung mit stärke- und zuckerhaltigen Futtermitteln zu mikrobiellen Veränderungen führt. Wie in der Arbeit ebenfalls ersichtlich wird, hat besonders Gerste akute Auswirkungen auf die Mikrobiota. Dieses Erkenntnis sollte unbedingt bei der Fütterung von Pferden unterschiedlichen Alters berücksichtigt werden.

Obwohl die Untersuchung der Mikrobiota als eine aufstrebende Wissenschaft gilt, befinden sich einige Forschungsbereiche noch relativ am Anfang. Im Rahmen dieser Arbeit war das besonders in Bezug auf die Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf die Mikrobiota bemerkbar. Im Vergleich zu anderen Tieren sind die Daten zu Pferden und deren Mikrobiota noch nicht sehr ausgereift und in mancher Hinsicht, wie zum Beispiel der Einfluss des Alters darauf, sehr rar. Nun ist es an der Zeit in diesem Bereich auf wissenschaftlicher Ebene voran zu kommen.

## 7 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Literaturarbeit bestand darin, das aktuelle Wissen über die Mikrobiota im equinen Gastrointestinaltrakt zu analysieren und sich dabei auf Faktoren zu konzentrieren, die die gastrointestinale Mikrobiota beeinflussen, wobei insbesondere altersbedingte Veränderungen im Fokus standen.

Der circa 30 m lange Verdauungstrakt eines adulten Warmblutpferdes beherbergt eine Vielzahl an verschiedenen Mikroorganismen, welche sich je nach Verdauungsabschnitt in Vorkommen und Anzahl unterscheiden. Für die Unterstützung und Aufrechterhaltung der Gesundheit und des Tierwohls ist das Zusammenspiel der einzelnen Kompartimente inklusive der Mikrobiota unentbehrlich. Die aktuell zur Verfügung stehenden Daten zeigen, dass es sich bei der Mikrobiota des Verdauungstrakts um ein sehr komplexes Ökosystem handelt, welches sich im Laufe des Lebens weiterentwickelt. Trotz der ähnlichen mikrobiellen Zusammensetzung von heranwachsenden und adulten Pferden gibt es einige Einflussfaktoren, die die Mikrobiota des einzelnen Tieres individuell verändern können.

Mit Hilfe der aktuellen Literatur konnten die mikrobiellen Veränderungen unter Einfluss des Alters und der Ernährung nachvollzogen werden. In Hinsicht auf das Alter wurde gezeigt, dass vor allem in den ersten Lebenstagen eines Pferdes vermehrt Veränderungen stattfinden. Da die Mikrobiota eines jungen Pferdes früh der eines adulten Pferdes gleicht, sind mikrobielle Veränderungen vornehmlich auf andere Einflussfaktoren zurückzuführen. Besondere Aufmerksamkeit liegt hier auf der Ernährung als Einflussfaktor, denn hier treten bei einer stärkehaltigen Fütterung häufig signifikante Veränderungen der Bakterienzusammensetzung und -vielfalt auf.

Obwohl sich einige Studien dieses Forschungsbereichs annehmen, sind die Daten dazu noch lange nicht ausreichend. In Zukunft ist es wichtig, weitere Studien, in denen die mikrobielle Zusammensetzung des equinen Gastrointestinaltrakts – nicht ausschließlich, aber auch bei älteren Pferden – im Mittelpunkt steht, durchzuführen. Ferner sind auch Zusammenhänge zwischen Mikrobiota und häufig verwendeten Medikamenten sowie deren Auswirkung auf die Mikrobiota des Pferdes für den klinischen Alltag von großer Bedeutung. Das bereits vorhandene Wissen und die technologische Weiterentwicklung sollen genutzt werden, um Untersuchungen auf diesem Forschungsgebiet voranzutreiben.

## 8 Summary

The aim of this literature review was to analyse the current knowledge on the microbiota in the equine gastrointestinal tract, focusing on factors that influence the gastrointestinal microbiota, particularly age-related changes.

The approximately 30 m long digestive tract of an adult warm-blooded horse harbours a large number of different microorganisms, which vary in abundance and number depending on the gastrointestinal section. The interaction of the individual compartments, including the microbiota, is indispensable for the support and maintenance of animal health and welfare. The currently available data show that the microbiota of the digestive tract is a very complex ecosystem that evolves throughout life. Despite the similar microbial composition of growing and adult horses, there are some influencing factors that can change the microbiota of the individual animal.

Based on current literature, the microbial changes under the influence of age and diet could be demonstrated. With regard to age, it was shown that the most pronounced changes take place especially in the first days of a horse's life. Since the microbiota of a young horse resembles that of an adult horse early on, microbial changes may be mostly due to other influencing factors. Special attention is given to nutrition as an influencing factor. In contrast to age, significant changes in bacterial composition and diversity often occur with a starchy diet.

Although some studies deal with this area of research, the current state of knowledge is still far from sufficient. In the future, it is important to carry out further studies focusing on the microbial composition of the equine gastrointestinal tract – not limited to, but also in elderly horses. Furthermore, correlations between microbiota and commonly used drugs as well as their effect on the equine microbiota are of great importance for clinical practice. The existing knowledge and technological progress will be used to advance investigations in this research area.

## 9 Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abb. 1: Aufbau des Gastrointestinaltrakts eines adulten Pferdes [5]. .....   | 2  |
| Abb. 2: Rechte Seitenansicht mit Darstellung des Blinddarms, rechter Dickdarm und Zwölffingerdarm [6]. .....                     | 4  |
| Abb. 3: Relative Häufigkeit der wichtigsten Stämme im Magen-Darm-Trakt [14]. .....   | 10 |
| Abb. 4: Einteilung Stamm Firmicutes in den vorkommenden Klassen [14]. .....  | 11 |
| Abb. 5: Übersicht der Kernmikrobiota im Magen-Darm-Trakt von Pferden [Abb.: Jasmin Hasenöhr] .....                               | 13 |
| Abb. 6: Entwicklung der Bakterienstämme in den Faeces von Fohlen von der Geburt bis zum siebten Lebenstag [1]. .....             | 17 |
| Abb. 7: Relative Häufigkeit von Bakterienstämmen in den Faeces verschiedener Altersgruppen ab der Geburt (= Day 1) [16]. .....   | 18 |
| Abb. 8: Relative Häufigkeit von Bakteriengattungen in den Faeces verschiedener Altersgruppen ab der Geburt (= Day 1) [16]. ..... | 19 |
| Abb. 9: Wege der Hydrolyse pflanzlicher Polysaccharide im Dickdarm [18]. .....   | 22 |

## 10 Abkürzungsverzeichnis

|                        |   |
|------------------------|---|
| % .....                | Prozent   |
| Abb. ....              | Abbildung                                       |
| cm .....               | Centimeter                                      |
| HCl.....               | Salzsäure                                       |
| l .....                | Liter   |
| m .....                | Meter   |
| ml .....               | Milliliter                                      |
| SCFA .....             | short chain fatty acids, Kurzkettige Fettsäuren |
| Streptococcus spp..... | Streptococcus species pluralis                  |

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Chaucheyras-Durand, F., Sacy, A., Karges, K., & Apper, E. (2022). Gastro-Intestinal Microbiota in Equines and Its Role in Health and Disease: The Black Box Opens. *Microorganisms*, 10(2517). doi:10.3390/microorganisms10122517
- [2] Garber, A., Hastie, P., & Murray, J.-A. (2020). Factors Influencing Equine Gut Microbiota: Current Knowledge. *Journal of Equine Veterinary Science*, 88. doi:10.1016/j.jevs.2020.102943
- [3] Share, E., Mastellar, S. L., & Zynda, H. M. (2022). *The Gastrointestinal Tract of the Horse*. Von Ohioline: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/1022> abgerufen
- [4] Ericsson, A. C., Johnson, P. J., Lopes, M. A., Perry, S. C., & Lanter, H. R. (2016). A Microbiological Map of the Healthy Equine Gastrointestinal Tract. *PLoS ONE*, 11(11). doi:10.1371/journal.pone.0166523
- [5] Van Weyenberg, S., Sales, S., & Janssens, G. (2006). Passage rate of digesta through the equine gastrointestinal tract: A review. *Livestock Science*, 99(1), 3-12. doi:10.1016/j.livprodsci.2005.04.008
- [6] Moore, J. N., Melton, T., Carter, W. C., Wright, A. L., & Smith, M. L. (2001). A New Look at Equine Gastrointestinal Anatomy, Function, and Selected Intestinal Displacements. *AAEP Proc.*, 47, 53-60.
- [7] Dicks, L., Botha, M., Dicks, E., & Botes, M. (2014). The equine gastro-intestinal tract: An overview of the microbiota, disease and treatment. *Livestock Science*, 160, 69-81. doi:10.1016/j.livsci.2013.11.025
- [8] Hintz, H. (1975). Digestive physiology of the horse. *J S Afr Vet Assoc.*
- [9] Daly, K., Proudman, C. J., Duncan, S. H., Flint, H. J., Dyer, J., & Shirazi-Beechey, S. P. (2012). Alterations in microbiota and fermentation products in equine large intestine in

- response to dietary variation and intestinal disease. *British Journal of Nutrition*, 107(7), 989-95. doi:10.1017/S0007114511003825
- [10] Morrison, P. K., Newbold, C. J., Jones, E., Worgan, H. J., Grove-White, D. H., Dugdale, A. H., . . . McG Argo, C. (2018). The Equine Gastrointestinal Microbiome: Impacts of Age and Obesity. *Front Microbiol.*, 9(3017). doi:10.3389/fmicb.2018.03017
- [11] Kauter, A., Epping, L., Semmler, T., Antao, E.-M., Kannapin, D., Stoeckle, S. D., . . . Walther, B. (2019). The gut microbiome of horses: current research on equine enteral microbiota and future perspectives. *Animal Microbiome*, 1-15. doi:10.1186/s42523-019-0013-3
- [12] Fey, K., & Sasse, H. (1996). Zur Darmflora des Pferdes - Eine Literaturstudie. *Pferdeheilkunde* 12, 855-863.
- [13] Morrison, P. K., Newbold, C. J., Jones, E., Worgan, H. J., Grove-White, D. H., Dugdale, A. H., . . . McG Argo, C. (2020). Effect of age and the individual on the gastrointestinal bacteriome of ponies fed a high-starch diet. *PLoS One*. doi:10.1371/journal.pone.0232689
- [14] Costa, M., Silva, G., Ramos, R., Staempfli, H., Arroyo, L., Kim, P., & Weese, J. S. (2015). Characterization and comparison of the bacterial microbiota in different gastrointestinal tract compartments in horses. *The Veterinary Journal*, 205(1), 74-80. doi:10.1016/j.tvjl.2015.03.018
- [15] Schoster, A., Weese, J. S., & Guardabassi, L. (2014). Probiotic use in horses - what is the evidence for their clinical efficacy? *J Vet Intern Med*, 1640-52. doi:10.1111/jvim.12451
- [16] Costa, M. C., Stämpfli, H. R., Allen-Vercoe, E., & Weese, J. S. (2016). Development of the faecal microbiota in foals. *Equine Veterinary Journal*, 48(6), 681-688. doi:10.1111/evj.12532

- [17] Wisniewska, M., Janczarek, I., & Piwczynski, D. (2019). The Aging Phenomenon of Horses With Reference to Humane-Horse Relations. *Journal of Equine Veterinary Science*, 73, 37-42. doi:10.1016/j.jevs.2018.11.005
- [18] Julliand, V., & Grimm, P. (May 2017). The Impact of Diet on the Hindgut Microbiome. *Journal of Equine Veterinary Science*, 52, 23-28. doi:10.1016/j.jevs.2017.03.002
- [19] Langner, K., Blaue, D., Schedlbauer, C., Starzonek, J., Julliand, V., & Vervuert, I. (2020). Changes in the faecal microbiota of horses and ponies during a two-year body weight gain programme. *PLoS One.*, 15(3). doi:10.1371/journal.pone.0230015
- [20] Willette, J. A., Pitta, D., Indugu, N., Vecchiarelli, B., Hennessy, M. L., Dobbie, T., & Southwood, L. L. (2021). Experimental crossover study on the effects of withholding feed for 24 h on the equine faecal bacterial microbiota in healthy mares. *BMC Veterinary Research*, 17(3). doi:10.1186/s12917-020-02706-8
- [21] Schoster, A. (2018). Probiotic Use in Equine Gastrointestinal Disease. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice*, 34(1), 13-24. doi: 10.1016/j.cveq.2017.11.004
- [22] Schoster, A., Staempfli, H., Abrahams, M., Jalali, M., Weese, J., & Guardabassi, L. (2015). Effect of a Probiotic on Prevention of Diarrhea and *Clostridium difficile* and *Clostridium perfringens* Shedding in Foals. *J Vet Intern Med*, 29(3), 925-31. doi:10.1111/jvim.12584
- [23] Tanabe, S., Suzuki, T., Wasano, Y., Nakajima, F., Kawasaki, H., Tsuda, T., . . . Morita, H. (2014). Anti-inflammatory and Intestinal Barrier-protective Activities of Commensal Lactobacilli and Bifidobacteria in Thoroughbreds: Role of Probiotics in Diarrhea Prevention in Neonatal Thoroughbreds. *J Equine Sci.*, 25(2), 37-43. doi:10.1294/jes.25.37
- [24] Schoster, A., Guardabassi, L., Staempfli, H., Abrahams, M., Jalali, M., & Weese, J. (2016). The longitudinal effect of a multi-strain probiotic on the intestinal bacterial microbiota of neonatal foals. *Equine Vet J*, 48(6), 689-696. doi: 10.1111/evj.12524

- [25] Mullen, K., Yasuda, K., Divers, T., & Weese, J. (2018). Equine faecal microbiota transplant: Current knowledge, proposed guidelines and future directions. *Equine vet. Educ.*, 30(3), 151-160. doi:10.1111/eve.12559