

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences, Department Ökotrophologie

Bachelorarbeit

**Effekte von Probiotika-Einnahmen auf direkte und
indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit
von Athlet*innen**

vorgelegt von Kea Nissen

Schellingstraße 75, 22089 Hamburg, Matrikelnummer: [REDACTED]

Hamburg, 29. September 2025

Erstgutachterin: Prof. Dr. Anja Carlsohn

Zweitgutachterin: Prof. Dr. Nina Riedel

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abstract	1
1. Einleitung	2
2. Grundlagen des Mikrobioms und der Probiotika	3
2.1. Darmbarriere	3
2.2. Darmmikrobiom.....	5
2.3. Probiotika	5
3. Die Ausdauer-Leistungsfähigkeit.....	7
3.1. Definition von Ausdauer	7
3.2. Direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit.....	7
3.3. Indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit	8
3.4. Definition von Athlet*innen.....	10
4. Methode.....	11
5. Ergebnisse	13
5.1. PICOR-Tabelle.....	13
5.2. Effekte auf direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit.....	19
5.2.1. VO ₂ max	19
5.2.2. Zeit bis zur Erschöpfung	19
5.3. Effekte auf indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit.....	20
5.3.1. Immunsystem und gesundheitliche Beschwerden.....	20
5.3.2. Inflammatorische Marker.....	21
5.3.3. Sonstige indirekte Parameter.....	22
6. Diskussion	23
6.1. Direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit.....	23
6.2. Indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit	24
6.3. Geschlechterspezifische Unterschiede	26
7. Schlussfolgerungen	26
8. Literaturverzeichnis.....	27
9. Anhang	39
9.1. Eidesstattliche Erklärung.....	39

Effekte von Probiotika-Einnahmen auf direkte und indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit von Athlet*innen

Zusammenfassung

Probiotika werden zunehmend als potenzielle unterstützende Maßnahme zur Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit diskutiert, da sie über das Darmmikrobiom immunologische und gastrointestinale Prozesse modulieren können. Gleichzeitig sind Athlet*innen durch hohe Trainingsbelastungen anfällig für Infekte, entzündliche Prozesse und gastrointestinale Beschwerden, die die Leistungsfähigkeit einschränken können. Ziel dieser Arbeit ist es, den aktuellen Forschungsstand systematisch zu analysieren und die Wirkung von Probiotika auf direkte Parameter wie VO₂max und Zeit bis zur Erschöpfung sowie auf indirekte Parameter wie Infektanfälligkeit, gastrointestinale Beschwerden und Entzündungsmarker zu bewerten. Hierfür wurde eine systematische Literaturrecherche in der Datenbank „PubMed“ durchgeführt, die randomisierte Kontrollstudien identifizierte, in denen der Einsatz und die Effekte von Probiotika bei Athlet*innen untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass Probiotika in einigen Studien positive Effekte auf die VO₂max und bestimmte indirekte Parameter aufweisen. Die Zeit bis zur Erschöpfung blieb hingegen überwiegend unbeeinflusst. Insgesamt unterschieden sich Studiendesign, eingesetzte Stämme, Interventionsdauer und untersuchte Populationen, was ein möglicher Grund für die heterogenen Ergebnisse sein kann. Die Arbeit leistet einen Beitrag zur systematischen Einordnung der bisherigen Evidenz und verdeutlicht sowohl Chancen als auch Einschränkungen. Probiotika könnten für Athlet*innen eine mögliche ergänzende Strategie zur Reduktion von Risiken wie Infekten und gastrointestinalen Beschwerden darstellen, und so indirekt zur Verbesserung der Ausdauer-Leistungsfähigkeit beitragen. Gleichzeitig begrenzen kleine Stichprobengrößen, heterogene Studiendesigns und fehlende geschlechtsspezifische Analysen die Aussagekraft der bisherigen Befunde. Zukünftige Forschung sollte größere, standardisierte und differenzierte randomisierte Kontrollstudien durchführen, um die klinische Relevanz von Probiotika für die Ausdauerleistung verlässlich einschätzen zu können.

Abstract

Probiotics are increasingly discussed as a potential supportive strategy to improve endurance performance, as they may modulate gastrointestinal and immune processes via the gut microbiome. At the same time, athletes are prone to infections, inflammatory processes, and gastrointestinal complaints due to high training loads, all of which may impair performance. The aim of this thesis is to systematically review the current state of research and evaluate the effects of probiotics on direct parameters

such as VO₂max and time to exhaustion, as well as on indirect parameters such as infection incidence, gastrointestinal symptoms, and inflammatory markers. A systematic literature search was conducted in the "PubMed" database to identify randomized controlled studies investigating probiotic supplementation in the context of endurance exercise. Results indicate that probiotics demonstrated positive effects on VO₂max and certain indirect parameters in some studies, while time to exhaustion remained largely unaffected. Overall, outcomes varied considerably which could be caused by different study designs, probiotic strains, intervention duration, and participant populations. This thesis contributes to the systematic classification of existing evidence, highlighting both opportunities and limitations. Probiotics may represent a supportive strategy for athletes aiming to reduce infection risk and gastrointestinal complaints and thus indirectly contribute to improving endurance performance. However, the current evidence is limited by small sample sizes, heterogeneous study designs, and the lack of sex-specific analyses. Future research should therefore implement larger, standardized, and more differentiated trials to reliably assess the clinical relevance of probiotics for endurance performance.

1. Einleitung

Weltweit gewinnt der Ausdauersport an Beliebtheit, was sich auch an den steigenden internationalen Teilnehmer*innenzahlen bei Events wie dem New York City- oder Berlin-Marathon zeigt (Reusser et al., 2021; Vitti et al., 2020). Gleichzeitig benötigen die Läufer*innen immer mehr Zeit für den Marathon. So betrug die Laufzeit der männlichen Teilnehmer des New York City Marathons in den 1980er-Jahren im Durchschnitt 3 Stunden und 47 Minuten, während sie sich in den 2010er-Jahren auf 4 Stunden und 23 Minuten verlängerte (Vitti et al., 2020). Um die Leistungsfähigkeit von Athlet*innen zu steigern, wird neben dem Ausdauertraining zusätzlich auf Ernährungsstrategien, Nahrungsergänzungsmittel und weitere Präparate mit potenziell ergogenen Effekten gesetzt (Maughan et al., 2018). Jedoch ist auch ein gesunder Allgemeinzustand von Sportler*innen essenziell, um Leistungspotenziale in Trainings- und Wettkampfphasen auszuschöpfen. Insbesondere immunologische und gastrointestinale Aspekte spielen eine zentrale Rolle, da intensive und langandauernde Belastungen häufig mit einer erhöhten Infektanfälligkeit, gastrointestinalen Beschwerden sowie einer vermehrten Ausschüttung proinflammatorischer Marker assoziiert sind (Baskerville, Castell & Bermon, 2024). Diese Faktoren können die Trainingskontinuität und die Belastbarkeit im Wettkampf erheblich beeinträchtigen (Baker et al., 2024; De Oliveira, Burini & Jeukendrup, 2014).

Vor diesem Hintergrund rückt das Darmmikrobiom zunehmend in den Fokus der sportwissenschaftlichen Forschung. Studien zeigen, dass die Zusammensetzung und Diversität des Mikrobioms eng mit Immunfunktion, Energiehaushalt und Entzündungsregulation verbunden ist (Jäger et al., 2019; Theis et al., 2025). Sportliche Aktivität selbst kann das Mikrobiom modulieren (Mohr et al., 2020),

während umgekehrt ein ausgeglichenes Mikrobiom die Anpassungsfähigkeit an Trainingsbelastungen beeinflussen kann (Mach & Fuster-Botella, 2017).

Probiotika, definiert als lebende Mikroorganismen, „die bei oraler Aufnahme in ausreichender Menge einen protektiven Effekt auf die Gesundheit des Wirtes haben“ (FAO/WHO, 2001; zitiert nach Haller, Rimbach & Grune, 2013, S.281), werden daher als mögliche Strategie betrachtet, einen gesunden Allgemeinzustand und die Leistungsfähigkeit von Sportler*innen zu unterstützen. Aktuelle Meta-Analysen zeigen, dass Probiotika potenziell gastro-intestinale Symptome lindern, die Inzidenz von Atemwegserkrankungen verringern und entzündliche Marker modulieren könnten (L. Li et al., 2020; Zeng et al., 2025). Auch zu direkten Leistungsparametern wie der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO₂max), Zeit bis zur Erschöpfung oder Wettkampfleistungen, gibt es bereits Ergebnisse, welche bislang jedoch sehr inkonsistent sind, aber teilweise auf eine potenziell positive Wirkung hindeuten (Di Dio et al., 2023; C. Schreiber et al., 2021).

Daraus ergibt sich die Forschungslücke, die aufzeigt, dass bisher noch nicht geklärt werden konnte, unter welchen Bedingungen und durch welche Effekte Probiotika tatsächlich zur Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit beitragen können. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Effekte von Probiotika auf direkte und indirekte Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit von Athlet*innen nach aktuellem Forschungsstand systematisch darzustellen und kritisch zu bewerten.

2. Grundlagen des Mikrobioms und der Probiotika

2.1. Darmbarriere

Probiotika können zu einer verbesserten Darmbarriere beitragen (Zheng et al., 2023). Die Darmbarriere selbst ist ein komplexes, mehrschichtiges System, das aus Epithelzellen, einer Mukusschicht sowie verschiedenen Immunzellen besteht (Camilleri, 2019) (siehe Abb. 1). Sie schützt den Körper vor schädlichen Substanzen aus dem Darmlumen und reguliert gleichzeitig den Austausch lebenswichtiger Stoffe (Paone & Cani, 2020). Die Darmbarriere wird durch ein Netzwerk spezialisierter Zellkontakte gesichert, zu dem Tight Junctions, Adherens Junctions und Desmosomen gehören. Tight Junctions bilden die eigentliche Abdichtung zwischen benachbarten Epithelzellen und kontrollieren den parazellulären Transport von Molekülen und Ionen, während Adherens Junctions und Desmosomen die Zellen fest miteinander verankern und damit die

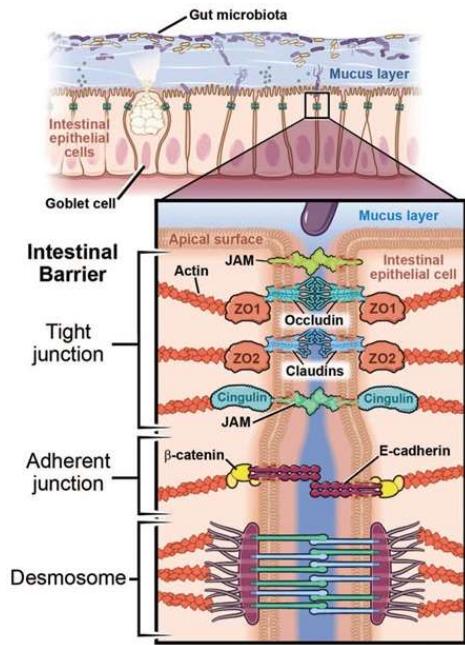


Abbildung 1: Aufbau der Darmbarriere (Santilli, Stefanopoulos & Cresci, 2022)

mechanische Stabilität des Epithels gewährleisten (France & Turner, 2017). France und Turner (2017) beschreiben zudem, dass diese Strukturen so entscheidend zur Barrierefunktion und zur funktionellen Polarität des Darmepithels beitragen, die für eine kontrollierte Interaktion mit Mikrobiota notwendig ist.

Das Darmepithel besteht aus spezialisierten Epithelzellen, darunter Enterozyten, Paneth-Zellen und Becherzellen (Yao et al., 2024). Es stellt eine zentrale physikalische Barriere zwischen dem Darmlumen und dem Körperinneren dar und ermöglicht gleichzeitig den selektiven Austausch von Nährstoffen, Ionen und Signalmolekülen mit dem darunterliegenden Gewebe, der Lamina propria (Odenwald & Turner, 2017). Die Epithelzellen übernehmen zudem eine Schlüsselfunktion: Sie beeinflussen die Entwicklung und Reifung von Immunzellen und reagieren auf Stimuli der Darmmikrobiota, etwa deren Metaboliten (Soderholm & Pedicord, 2019). Ein Teil dieser Reaktionen erfolgt über so genannte Pattern Recognition Receptors (PRRs), die charakteristische Muster (PAMPs) erkennen (Chu & Mazmanian, 2013).

Eine spezialisierte Form der Epithelzellen, die Becherzellen (engl.: Goblet Cells), produziert Muzine, die den Hauptbestandteil der Mukusschicht bilden (F. Schreiber et al., 2024). Diese Muzinproduktion kann durch Bakterien im Darm sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden (Soderholm & Pedicord, 2019). Die Mukusschicht überzieht die Epitheloberfläche und dient als Schutzbarriere vor pathogenen Mikroorganismen, Verdauungsenzymen und toxischen Substanzen aus dem Darmlumen. Gleichzeitig ermöglicht sie durch Diffusion den Transport von Wasser, Ionen, Nährstoffen und Gasen zu den Epithelzellen (Paone & Cani, 2020). Für die Mikrobiota stellt die Mukusschicht zudem eine nährstoffreiche Umgebung dar, da sie von den enthaltenen Glykoproteinen profitieren (Luis & Hansson, 2023).

Innerhalb des Epithels und in der Lamina propria befinden sich zahlreiche Immunzellen, darunter Makrophagen und Phagozyten. Diese Zellen steuern immunologische Abwehrmechanismen, indem sie Zytokine freisetzen, die Sekretion antimikrobieller Peptide regulieren und sekretorisches Immunoglobulin A (sIgA) produzieren (Yu et al., 2012). Auf Stimuli der Darmmikrobiota reagieren sie ebenfalls mit der Freisetzung regulatorischer Moleküle, die das Gleichgewicht des Immunsystems beeinflussen (Soderholm & Pedicord, 2019).

Die Darmbarriere interagiert wechselseitig mit dem Darmmikrobiom. Ein ausgewogenes Mikrobiom ist entscheidend für die Stabilität und Funktionsfähigkeit der Barriere. Veränderungen der Mikrobiota können sich direkt auf die Integrität der Barriere auswirken und damit gesundheitliche Folgen haben (Santilli, Stefanopoulos & Cresci, 2022).

2.2. Darmmikrobiom

Das Darmmikrobiom des Menschen ist ein komplexes und wandelbares Ökosystem, das sich aus Mikroorganismen wie Bakterien, Pilzen, Viren und Protozoen zusammensetzt (Li, Leonardi & Iliev, 2019). Van Hul et al. (2024) erläutern, dass eine einheitliche Definition eines „gesunden Mikrobioms“ bislang nicht existiert, aber zunehmend die funktionelle Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen als entscheidender für die Gesundheit angesehen wird. Fehlende Langzeitdaten, Einfluss externer Faktoren wie Ernährung oder Medikamente sowie mangelnde Standardisierung der Methodik stellen die Forschung vor Herausforderungen (Van Hul et al., 2024). Das Darmmikrobiom spielt eine wichtige Rolle für den Gesundheitszustand und beeinflusst zentrale Mechanismen wie die Reifung des Immunsystems und der Epithelzellen (Maciel-Fiuza et al., 2023). Über die Stoffwechselprodukte der Darmmikrobiota trägt es dazu bei, die Homöostase, also das Gleichgewicht im Körper und insbesondere im Darm, aufrechtzuerhalten (Rahman et al., 2023). Jedoch sind viele Metabolite der Darmmikrobiota, und insbesondere jene der Viren, Pilze und Bakteriophagen, noch nicht vollständig erforscht (Rahman et al., 2023).

Zu den bekannten Metaboliten der Darmmikrobiota gehören, neben weiteren, kurzkettige Fettsäuren (SCFAs), verzweigtkettige Aminosäuren (BCAAs), Laktat und sekundäre Gallensäuren (Kim, Seo & Kweon, 2024).

2.3. Probiotika

Probiotika werden in zahlreiche Spezies unterschieden. Am häufigsten kommen Gattungen der Spezies *Lactobacillus* und *Bifidobakterium* vor. (Haller, Rimbach & Grune, 2013, S.281). Azad et al. (2018) und Sánchez et al. (2017) beschreiben die Fähigkeit der Probiotika die Zusammensetzung, Vielfalt und Funktion des Darmmikrobioms zu beeinflussen. Des Weiteren erläutern die Forschenden, dass die gesundheitsfördernden Effekte von Probiotika auf mehreren Mechanismen beruhen: Sie können pathogene Mikroorganismen verdrängen, indem sie mit ihnen um Nährstoffe und Bindungsstellen konkurrieren und zur Stabilisierung der Mukusschicht, unter anderem durch Wirkung auf Tight junctions, beitragen. Darüber hinaus betonen sie, dass Probiotika immunregulatorisch wirken, indem sie die Aktivität von Makrophagen, dendritischen Zellen sowie T- und B-Lymphozyten beeinflussen und so Zytokine und die Produktion von sIgA modulieren. Über immunologische und neurochemische Signalwege entfalten sie zudem Effekte, die unter anderem zur Stressregulation beitragen können. Stoffwechselprodukte der Probiotika können zudem der Aufrechterhaltung der Darmgesundheit und insbesondere der epithelialen Homöostase, also dem Gleichgewicht im Darm, dienen (Azad et al., 2018; Sánchez et al., 2017).

Sehr bedeutsame Stoffwechselprodukte der Probiotika sind kurzkettige Fettsäuren, die durch die mikrobielle Fermentation von Ballaststoffen im Kolon entstehen (Slavin, 2013). Zu ihnen gehören Acetate, Butyrate und Propionate (Tomova et al., 2019). Diese SCFAs dienen primär als

Energiequelle für die Epithelzellen des Kolons, insbesondere Butyrat, das als Hauptenergielieferant für diese Zellen fungiert und deren Funktion unterstützt (Zhang et al., 2023). SCFAs wirken jedoch nicht nur lokal. Portincasa et al. (2022) beschreiben, dass ein Teil in die Leber gelangt, wo sie den Energiestoffwechsel beeinflussen können. Insbesondere Butyrat verbessert zudem die Insulinsensitivität und hemmt die Gluconeogenese, was zudem eine Rolle in der Blutzuckerregulation spielt (Portincasa et al., 2022). Darüber hinaus gelangen SCFAs in den peripheren Kreislauf und können dort verschiedene physiologische Prozesse beeinflussen. Sie wirken über G-Protein-gekoppelte Rezeptoren und modulieren Immunantworten, indem sie entzündungsfördernde Zytokine regulieren und die Aktivität regulatorischer T-Zellen beeinflussen (Liu et al., 2023). Insgesamt tragen SCFAs somit nicht nur zur Aufrechterhaltung der Darmbarriere bei, sondern haben auch Auswirkungen auf den Stoffwechsel und das Immunsystem.

Darüber hinaus haben Probiotika eine wechselwirkende Beziehung mit bestimmten Mikronährstoffen. Vitamine und Mineralien beeinflussen die Zusammensetzung und Aktivität der Mikrobiota, während probiotische Stämme wiederum die Bioverfügbarkeit von Mikronährstoffen verbessern können (Bermúdez-Humarán et al., 2024). Die aktuelle Forschung deutet darauf hin, dass die Kombination von Probiotika mit Vitaminen und Mineralien das Risiko für Atemwegsinfekte senken sowie Stress und Fatigue reduzieren kann (Bermúdez-Humarán et al., 2024).

Neben den beschriebenen Mechanismen rückt zunehmend die Stammspezifität probiotischer Effekte in den Fokus. So deuten aktuelle Ergebnisse darauf hin, dass *Lactobacillus plantarum* 299v die Eisenaufnahme bei Athletinnen mit niedrigen Ferritin-Werten verbessern kann (Axling et al., 2020). Meta-Analysen zeigen, dass nicht alle Probiotika gleichermaßen wirksam sind, sondern die Effekte eng von der Kombination aus Bakterienstamm, Dosis, Interventionsdauer und der untersuchten Population abhängen scheinen (Aykut et al., 2024).

Ein weiterer Aspekt der Forschung ist die Wechselwirkung von Probiotika mit der Darm-Hirn-Achse. Hierbei steht im Vordergrund, dass bestimmte probiotische Stämme neuroaktive Substanzen beeinflussen können, die wiederum Stressregulation und Erholung nach Belastung modulieren (Patel et al., 2024).

Im Kontext der Ausdauer-Leistungsfähigkeit zeigten Scheiman et al. (2019), dass das Bakterium *Veillonella atypica* die Ausdauerleistung beeinflusst, indem es Laktat im Darm zu Propionat umwandelt. In der Studie führte bei Mäusen sowohl die Besiedelung mit *V. atypica* als auch die direkte Gabe von Propionat zur Verlängerung der Zeit bis zur Erschöpfung. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass probiotische bzw. mikrobiota-basierte Interventionen das Potenzial haben, die sportliche Leistungsfähigkeit gezielt zu steigern (Scheiman et al., 2019, zitiert nach Sales & Reimer, 2023). Allerdings sind die Ergebnisse bei Menschen bisher inkonsistent, was vor allem auf Unterschiede in den

verwendeten Stämmen, Dosierungen, Interventionsdauern und untersuchten Populationen zurückgeführt wird (Hitch et al., 2022).

3. Die Ausdauer-Leistungsfähigkeit

3.1. Definition von Ausdauer

In sportwissenschaftlichen Betrachtungen gilt Ausdauer als eine konditionelle Fähigkeit, die es ermöglicht, körperliche Belastungen über längere Zeit aufrechtzuerhalten bzw. Ermüdung hinauszögern. So wird die Ausdauer-Leistungsfähigkeit als die Fähigkeit beschrieben, physische Anforderungen über längere Zeit zu bewältigen und gleichzeitig die Ermüdung zu verzögern (Faude & Donath, 2023, S. 849-864). Diese Leistungsfähigkeit wird durch ein Zusammenspiel von muskulären, kardiovaskulären und neurologischen Faktoren bestimmt, die gemeinsam eine effiziente Energiebereitstellung ermöglichen (Joyner & Coyle, 2008). Neben dem aeroben Energiestoffwechsel und muskulären Faktoren, die bereits umfassend beschrieben sind, wird auch die Rolle des zentralen Nervensystems diskutiert, da dessen Steuerungsprozesse wesentlich zur Widerstandsfähigkeit gegenüber Ermüdung beitragen können (Yang et al., 2024).

3.2. Direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit

Zur Beschreibung der Ausdauerleistungsfähigkeit werden in der Sportwissenschaft sowohl direkte als auch indirekte Indikatoren herangezogen. Direkte Parameter erlauben eine unmittelbare Beurteilung der kardiovaskulären und muskulären Leistungsfähigkeit. Sie gelten daher als zentrale Referenzgrößen zur Bestimmung des Ausdauerpotenzials (Bassett & Howley, 2000).

Unter anderem in der Arbeit von Martin-Rincon und Calbet (2020) wird die VO₂max als die höchste Menge an Sauerstoff, die vom Organismus aufgenommen, transportiert und in der Muskulatur verwertet werden kann beschrieben. Die Forschenden beschreiben, dass sie das Zusammenspiel des pulmonalen, kardiovaskulären und muskulären Systems auf die Ausdauer-Leistungsfähigkeit widerspiegelt und zu den wichtigsten Faktoren zählt, die diese bestimmen. Die Ermittlung der VO₂max ist komplex und wird von Protokoll, Messgerät, Datenverarbeitung und Testperson beeinflusst (Martin-Rincon & Calbet, 2020). Allerdings gibt es große individuelle Unterschiede wie sich die VO₂max als Reaktion auf Ausdauertraining verändert. So zeigten etwa 20% der Teilnehmer*innen einer Studie trotz Ausdauertraining keine Verbesserung der kardiorespiratorischen Fitness (Meyler, Bottoms & Muniz-Pumares, 2021).

Die Zeit bis zur Erschöpfung beschreibt die Dauer, über die eine Person eine vorgegebene Belastungsintensität aufrechterhalten kann, bevor die Fortführung aufgrund physiologischer oder psychischer Limitierungen nicht mehr möglich ist (Ament & Verkerke, 2009). Da der Test bis zum Abbruch durch subjektive Erschöpfung reicht, integriert er sowohl die Kapazität des aeroben Energiestoffwechsels als auch Faktoren der muskulären Ermüdung und der mentalen Belastbarkeit (VanHaitmsma

et al., 2023). Die Zeit bis zur Erschöpfung gilt als Marker, um die individuelle Ausdauer-Leistungsfähigkeit unter kontrollierten Bedingungen zu erfassen, wenngleich die hohe Abhängigkeit von der individuellen Motivation die Reliabilität der Ergebnisse einschränken kann (Barte et al., 2019; Inoue et al., 2023).

Die Laktatschwelle, wie von Faude, Kindermann und Meyer (2009) beschrieben, bezeichnet den Belastungsbereich, in dem die Laktatproduktion die Laktatelimination übersteigt und die Blutlaktatkonzentration systematisch ansteigt. Sie galt lange als zentraler Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit, da sie eng mit der Dauerbelastbarkeit und der Ermüdungsentwicklung verknüpft ist (Faude, Kindermann & Meyer, 2009). Es wird jedoch diskutiert, wie aussagekräftig die Laktatschwelle tatsächlich ist. Eine aktuelle Studie fand keine signifikanten Unterschiede im prozentualen Anteil der Laktatschwelle an der VO₂max zwischen Elite-, National- und Regionalathlet*innen, was ihre prädiktive Aussagekraft einschränkt (Johansen et al., 2025). Damit zeigt sich, dass die Laktatschwelle zwar einen wichtigen direkten Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit darstellt, aber stets im Zusammenhang mit weiteren Größen wie der VO₂max interpretiert werden sollte.

3.3. Indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit

Neben den direkten Parametern lassen sich Aspekte der Ausdauerleistungsfähigkeit auch über indirekte Parameter erfassen, indem sie Hinweise auf Stoffwechselanpassungen, den Gesundheitszustand und weitere zentrale Mechanismen liefern. Dazu dienen unter anderem Entzündungsmarker und Parameter des Immunsystems.

Zytokine sind wesentlich an der Steuerung von Entzündungsreaktionen beteiligt und bestimmen die Zusammensetzung der Immunzellen in entzündetem Gewebe, deren Aktivierungszustand sowie die systemischen Effekte der Entzündung (Brenner et al., 2014).

Interleukine (IL) sind eine Form von Zytokinen. Es gibt zahlreiche Interleukine, die sich in ihren Funktionen unterscheiden.

Eine Form ist das Interleukin-6 (IL-6). Es wird von verschiedenen Zelltypen, wie B- und T-Zellen ausgeschüttet (Kany et al., 2019). IL-6 ist im Zusammenspiel von Darmepithel, Immunsystem und Darmmikrobiota bedeutend. Bestimmte Bakterien fördern die Ausschüttung von IL-6 im Darm, andere Bakterien sowie SCFAs können die Produktion des Interleukins hemmen, was für Entzündungsreaktionen bedeutsam ist (Kany et al., 2019), denn IL-6 wirkt inflammatorisch, indem es die Produktion des C-reaktiven Proteins (CRP) begünstigt (Waśkiewicz et al., 2025).

Interleukin-4 spielt für Typ-2-Immunantworten eine Rolle. Dazu gehören Allergien, Parasitenabwehr oder Entzündungen. Es kann die Gewebereparatur, also auch die Regeneration von Muskelgewebe, unterstützen (Keegan, Leonard & Zhu, 2021).

Das pro-inflammatorische IL-8 gehört zu den Chemokinen. Das bedeutet, dass es auf Immunzellen wirkt, in diesem Falle Neutrophile, die durch das Interleukin bei Entzündungen aktiviert werden (Matsushima, Yang & Oppenheimer, 2022).

IL-10 wirkt immunregulatorisch mit vielseitigen Einflüssen auf Immunzellen. Das Interleukin hat entzündungs- und immunhemmende Eigenschaften. So zum Beispiel die Hemmung der IL-6-Produktion. Durch die Unterstützung regulatorischer T-Zellen kann es das Immunsystem auch aktivieren (Goswami et al., 2022).

Das Interleukin 1 β wirkt stark inflammatorisch. Es hat diverse systemische und lokale Auswirkungen. (Lopez-Castejon & Brough, 2011). Su & Su (2025) schildern, dass die Konzentration von IL-1 β während intensiver Ausdauerbelastung ansteigt, was auf eine akute inflammatorische Reaktion hinweist. Diese Erhöhung kann als indirekter Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit dienen, da sie Rückschlüsse auf die Trainingsbelastung und den Erholungsstatus ermöglicht (Su & Su, 2025).

Ebenfalls entzündungsfördernd ist das Zytokin TNF α , welches für die frühe Immunantwort zuständig ist und wichtige Immunzellen wie Makrophagen, B- und T-Lymphozyten aktiviert (Mercogliano et al., 2021). Die Werte von TNF- α korrelieren häufig mit weiteren inflammatorischen Markern wie IL-6 und IL-1 β , was eine Beurteilung der Trainingsbelastung und der individuellen Anpassung ermöglicht (Su & Su, 2025).

Interferon γ (IFN γ) spielt eine wichtige Rolle bei der Abwehr von Infektionen und der Immunregulation. Es aktiviert Makrophagen, damit sie Krankheitserreger wie Bakterien effektiver bekämpfen können und fördert die zelluläre Immunantwort gegen intrazelluläre Erreger wie Viren (Jorgovanovic et al., 2020).

Ein weiterer inflammatorischer Marker ist Zonulin. Das Protein wird von den Darmepithelzellen freigesetzt und beeinflusst die Darmbarriere durch Regulation der Tight Junctions, was wiederum durch aufgenommene Nahrung oder die Darmmikrobiota stimuliert wird (Tajik et al., 2020). Eine Dysbiose kann die Zonulin-Produktion fördern und ein zu hoher Zonulin-Spiegel die Durchlässigkeit des Darms erhöhen und zum sogenannten „Leaky Gut“ führen, welcher die Infektanfälligkeit und Freisetzung entzündungsfördernder Zytokine steigert (Fasano, 2020).

Das in der Leber gebildete C-reaktive Protein (CRP) ist Teil der angeborenen Immunabwehr und wird unter anderem bei Entzündungen, als Reaktion auf ausgeschüttete pro-inflammatorische Zytokine, freigesetzt. Es gilt als unspezifischer Entzündungsparameter. Bei einem erhöhten CRP-Spiegel liegt also eine Entzündung im Körper vor, es lässt sich daraus jedoch nicht schließen wo diese Entzündung liegt (Agrawal & Wu, 2024).

Neben Entzündungsparametern, stellen auch Immunglobuline, und insbesondere das sekretorische Immunglobulin A, indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit dar.

sIgA bildet die erste Immunabwehr des Darms. Werden Krankheitserreger erkannt, wird der Antikörper von Plasma-Zellen in das Darmlumen ausgeschüttet. sIgA schützt das Darmepithel, indem es an der Oberfläche der intestinalen Mukosa an Krankheitserreger bindet, wodurch sie weder an der Mukosa haften, noch die Darmbarriere durchdringen können (Song et al., 2023). sIgA kann zudem das Verhalten von Mikroben steuern, zum Beispiel deren Wachstum, Stoffwechsel oder Besiedlung des Darms. So können gezielt Stoffwechselwege einzelner Bakterienarten blockiert werden (Pietrzak et al., 2020). Das Immunglobulin reguliert die Immunhomöostase und erleichtert Mikrobiota die Ansiedlung auf der intestinalen Mukusschicht (Sutherland & Fagarasan, 2012). In ihrem Review für das International Olympic Committee (IOC) kommen Derman et al. (2022) zu dem Ergebnis, dass ein erniedrigerer sIgA-Spiegel ein Risikofaktor für eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Atemwegsinfekten bei Athlet*innen darstellt (Derman et al., 2022). Ein anderes Review aus dem Jahr 2025 kam zu ähnlichen und weiteren Ergebnissen. Chronisch intensives Ausdauertraining führte zu einer Verringerung von Immunglobulin G (IgG) und A (IgA), insbesondere nach hochintensiven Belastungen. Diese Verringerungen gingen bei Radsportlern, Rugby- und Eliteschwimmern mit einer höheren Infektanfälligkeit einher (Shi et al., 2025).

Atemwegsinfekte gehören bei Athlet*innen zu den häufigsten Ursachen für Trainingsausfälle, weshalb das Auftreten von Erkrankungen ebenfalls als indirekter Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit gilt (Schwellnus et al., 2022). Ausdauertraining, insbesondere langandauernde oder hochintensive Belastungen, kann zudem Schäden im Magen-Darm-Trakt verursachen. Zugunsten der beanspruchten Muskulatur verringert sich dabei die Durchblutung des Darms (Edwards et al., 2021). Das kann unter anderem oxidativen Stress und Störungen der Tight Junctions hervorrufen. Besonders während und nach Marathonläufen treten bei vielen Athlet*innen gastrointestinale Beschwerden auf. Solche Schäden können die Leistungsfähigkeit mindern und die Regeneration verzögern (Sumi & Suzuki, 2025).

3.4. Definition von Athlet*innen

In der sportwissenschaftlichen Literatur werden Athlet*innen unterschiedlich definiert. Araújo & Scharhag (2016) beschreiben den Begriff eher eng gefasst, indem sie Kriterien wie leistungsorientiertes Training, Wettkampfteilnahme und eine formale Einbindung in das Sportsystem betonen. Demgegenüber schlagen Campa & Coratella (2021) eine weiter gefasste Sichtweise vor, nach der auch regelmäßig trainierende Freizeitsportler eingeschlossen werden können, wenn sie ähnliche körperliche Merkmale wie Wettkampfsportler aufweisen.

In dieser Arbeit werden auch ambitionierte Freizeitsportler*innen berücksichtigt und in den Begriff „Athlet*innen“ einbezogen, um eine größere Studienbasis einzubeziehen und Vergleichbarkeit herzustellen.

4. Methode

Das Ziel dieser Arbeit ist es den aktuellen Forschungsstand zu Effekten von Probiotika auf direkte und indirekte Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit von Athlet*innen darzustellen und kritisch zu bewerten. Dazu wurde eine systematische Literaturrecherche in der Datenbank „PubMed“ durchgeführt. Die Entscheidung keine weiteren Datenbanken zu durchsuchen, basiert auf der breiten Abdeckung medizinischer und ernährungswissenschaftlicher Fachzeitschriften in PubMed, wodurch eine hohe Relevanz und Vollständigkeit der Treffer gewährleistet ist. Andere gängige Datenbanken wurden nicht einbezogen, da sie erfahrungsgemäß kaum bis keine zusätzlichen Ergebnisse erbringen.

Die endgültigen Schlagwörter der systematischen Suche waren „endurance“, „athlete“ und „probiotic“. Zunächst waren auch die Begriffe „aerobic“, „sports“, „microbiota“ und „microbiome“ Bestandteil der Suche. Sie wurden jedoch ausgeschlossen, da zuvor auffallend viele Ergebnisse keinen Bezug zur Forschungsfrage boten und die Suche daher spezifischer gestaltet werden sollte. Die verwendeten Schlagwörter wurden durch den Booleschen Operator „AND“ miteinander verknüpft, da die Suchergebnisse jeden dieser Begriffe enthalten sollten. Es wurden als Filter „Randomized Controlled Trial“ (RCT) und „Humans“ ergänzt, damit die Ergebnisse eine möglichst hohe Aussagekraft aufweisen. RCTs weisen aufgrund der Randomisierung und Kontrollbedingungen eine besonders hohe Validität auf und gelten als Goldstandard zur Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen (Hariton & Locascio, 2018). Durch die Fokussierung auf Primärstudien konnte zudem sichergestellt werden, dass die Analyse auf originalen, unverzerrten Daten basiert und nicht auf bereits zusammengefassten oder interpretierten Ergebnissen, wie es bei Reviews oder Meta-Analysen der Fall ist.

Alle Ergebnisse, die die Suche mit genannten Schlagwörtern und dem Operator „AND“ ergab, wurden zunächst anhand des Titels und anschließend durch Lesen des Abstracts darauf geprüft, ob sie in diese Arbeit einfließen könnten. Die dadurch eingeschlossenen Ergebnisse wurden nachfolgend im Volltext betrachtet und teilweise wieder ausgeschlossen.

Gründe für den Ausschluss von Studien waren, dass kein Ausdauersport während der Intervention durchgeführt wurde, es sich bei den Proband*innen nicht um Athlet*innen handelte oder keine direkten oder indirekten Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit erfasst wurden. Für den Einschluss von Studien sprach, wenn alle Teilnehmer*innen ambitionierte Freizeit- bis Profi-Athlet*innen waren, die eine Form von Ausdauersport betrieben, ein Probiotika- oder, in der Kontrollgruppe, ein Placebo-Präparat einnahmen und direkte oder indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit ermittelt wurden. Angaben zu Alter, Geschlecht und Ethnie der Athlet*innen wurden nicht berücksichtigt.

Eine Limitation dieser Methode ist die Begrenzung der Suche auf lediglich eine Datenbank. Diese Beschränkung birgt das Risiko vereinzelte relevante Publikationen zu übersehen.

Nachfolgend wird angewandte Suchstrategie tabellarisch und nachvollziehbar dargestellt (siehe Tab. 1). Ebenso wird durch ein Search Flow Chart der Verlauf des Ein- und Ausschlussprozesses der Suchergebnisse konkret aufgezeigt (siehe Abb. 2).

Tabelle 1: Suchstrategie

Suche	Suchanfrage	Ergebnisse
#1	(probiotics) OR (microbiota) OR (microbiome)	247673
#2	((endurance) OR (aerobic)) AND ((athlete) OR (sports))	259530
#3	#1 AND #2	1193
#4	#1 AND #2, Filter: Randomized Controlled Trial; Humans	177
#5	(endurance) AND (athlete) AND (probiotics), Filter: Randomized Controlled Trial; Humans	31

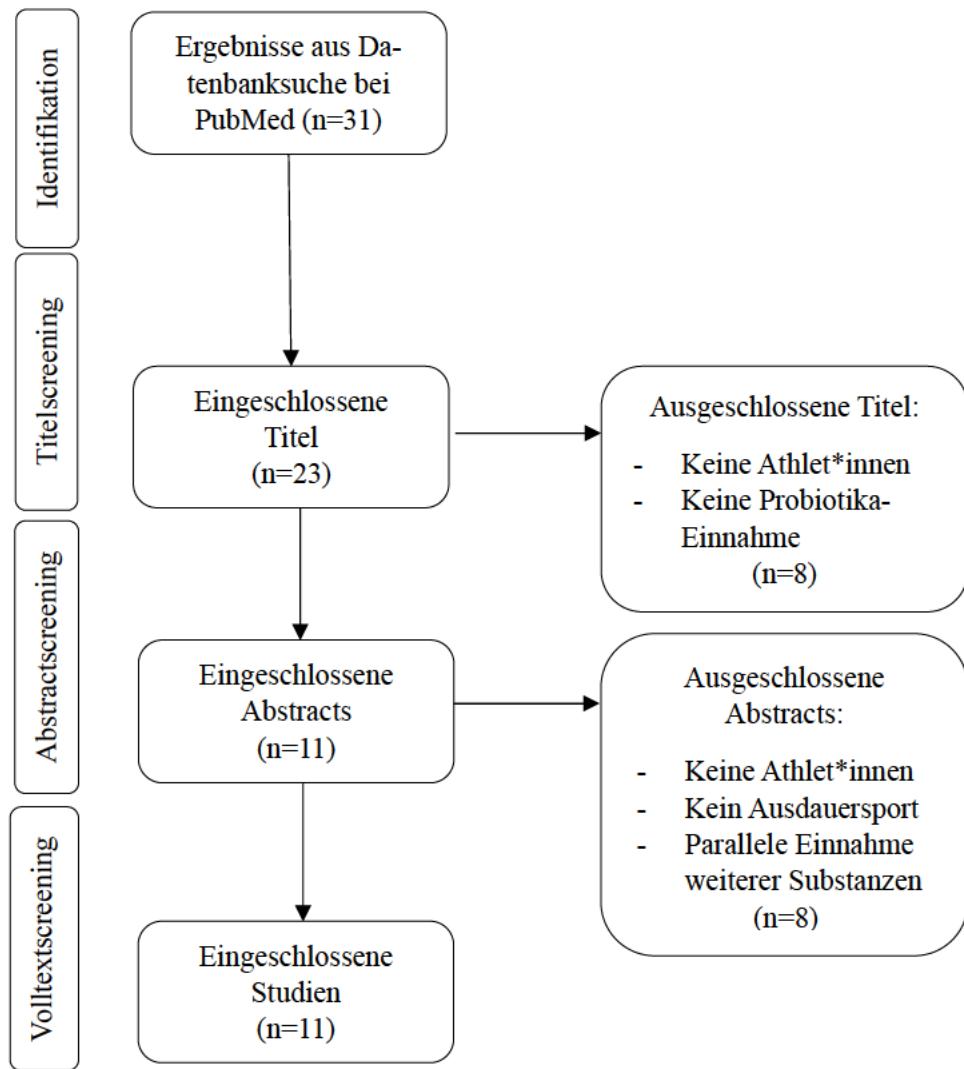


Abb. 2: Search Flow Chart

5. Ergebnisse

5.1. PICOR-Tabelle

Zur besseren Übersicht der eingeschlossenen Studien wurde ein PICOR-Schema erstellt. Diese fasst die zentralen Charakteristika der Studien hinsichtlich Population, Intervention, Kontrollbedingungen sowie untersuchter Outcomes zusammen und ermöglicht eine strukturierte Gegenüberstellung der Ergebnisse (siehe Tab. 2).

Tabelle 2: PICOR-Schema

Studie	Population	Intervention	Control	Outcome*	Result
Cox et al., 2010	20 hochtrainierte männliche Langstreckenläufer: 27,3 ± 6,4 Jahre, VO2max: 67,1 ± 4,5 ml/kg/min	Tägliche Einnahme eines Probiotika-Präparats mit <i>Lactobacillus fermentum</i> VRI-003 (PCC), Form: Kapseln, Dosis: 1,26x10 ¹⁰ KBE/Tag, Dauer: 4 Wochen	Placebo	Direkte Parameter: VO2max: ↔ Zeit bis zur Erschöpfung: ↔ Indirekte Parameter: IFN γ : ↔ IgA1: ↔ IL-12: ↔ IL-4: ↔ Krankheitsinzidenz: ↔ Krankheitsschwere: ↔ Krankheitstage: ↓ SIgA: ↔	Die Interventionsgruppe zeigte signifikant weniger Krankheitstage, unveränderte Erkrankungsinzidenz, tendenziell geringere Schwere mit Nähe zur Signifikanz (p<0,06). Keine signifikanten Unterschiede zeigten IgA1, SIgA sowie IL-4 und IL-12. IFN γ zeigte einen moderaten Anstieg in der Interventionsgruppe und Abstieg in der Kontrollgruppe jedoch ohne Signifikanz (p < 0,07). Die direkten Parameter zeigten keine signifikante Veränderung.
Gleeson et al., 2010	58 Ausdauerathlet*innen: 53 ♂, 31 ♀, 18–45 Jahre, Trainingsvolumen: 10,5 ± 4,6 Std./Woche	Tägliche Einnahme von <i>Lactobacillus casei</i> Shirota, Form: fermentiertes Milchgetränk, Dosis: mind. 6,5x10 ⁹ KBE/Tag, Dauer: 16 Wochen, während der Winter-/Frühjahrsaison	Placebo	Indirekte Parameter: GI-Dauer: ↔ GI-Inzidenz: ↔ GI-Prävalenz: ↓ GI-Schwere: ↔ Granulozyten: ↔ Lymphozytensubset: ↔ Monozyten: ↔ SIgA: ↑ URTI-Dauer: ↔ URTI-Inzidenz: ↓ URTI-Prävalenz: ↓ URTI-Schwere: ↔	Athlet*innen, die <i>L. casei</i> Shirota einnahmen, zeigten eine signifikant reduzierte Prävalenz und Inzidenz von URTIs sowie reduzierte Prävalenz von GIs. Dauer und Schwere der Symptome unterschieden sich nicht zwischen den Gruppen. Speichel-IgA stieg unter Probiotika-Einnahme signifikant an. Es gab keinen Effekt auf zelluläre Immunparameter.
Gleeson et al., 2012	54 Ausdauerathlet*innen: 36 ♂, 30 ♀, 23,9 ± 4,7 Jahre,	Tägliche Einnahme von <i>Lactobacillus salivarius</i> UCC118, Form: orale Suspension Dosis: 2x10 ¹⁰ KBE/Tag, Dauer: 16 Wochen,	Placebo	Indirekte Parameter: IFN γ : ↔ IL-10: ↔ IL-1 β : ↔ IL-6: ↔ IL-8: ↔	Die 16-wöchige <i>L. salivarius</i> -Einnahme zeigte keinen signifikanten Einfluss auf Inzidenz, Dauer oder Schwere von URTIs. Ebenfalls SIgA sowie pro- bzw.

	Trainingsvolumen: $10,3 \pm 3,7$ Std./Woche	während der Winter-/Frühjahrssaison		Indirekte Parameter: SIgA: ↔ TNF α : ↔ URTI-Inzidenz: ↔ URTI-Schwere: ↔ URTI-Tage: ↔	antiinflammatorische Zytokine blieben unverändert.
Gleeson et al., 2016	243 Athlet*innen: 18–32 Jahre, Trainingsvolumen: 11 ± 1 Std./Woche	Tägliche Einnahme von <i>Lactobacillus casei</i> Shirota, Form: fermentiertes Milchgetränk Dosis: mind. $6,5 \times 10^9$ KBE/Tag, Dauer: 20 Wochen	Placebo	Indirekte Parameter: CMV-IgG: ↓ EBV-IgG: ↓ Trainingsausfälle: ↔ URS-Dauer: ↔ URS-Inzidenz: ↔ URS-Schwere: ↔	Die Probiotika-Einnahme über 20 Wochen zeigte keinen Einfluss auf die Inzidenz, Dauer oder Schwere von Atemwegssymptomen und erhöhte die Trainingsbeteiligung nicht signifikant. Bei CMV- und EBV-seropositiven Teilnehmenden sanken die jeweiligen IgG-Titer signifikant.
Haywood et al., 2013	60 männliche Profi-Rugby-Union-Spieler: $24,7 \pm 3,6$ Jahre	Tägliche Einnahme eines Multistamm-Probiotika-Präparats mit <i>Lactobacillus gasseri</i> , <i>Bifidobacterium bifidum</i> und <i>Bifidobacterium longum</i> Form: Kapseln Dosis: 3×10^9 KBE/Tag, Dauer: 4 Wochen, während intensiver Trainings- und Wettkampfphase	Placebo	Indirekte Parameter: GI-Inzidenz: ↔ Inzidenz sonstiger Symptome: ↓ Krankheitsdauer: ↔ Symptom-Schwere: ↔ URTI-/GI-Inzidenz: ↓ URTI-Inzidenz: ↔	Rugby-Spieler, die ein Multistamm-Probiotika-Präparat einnahmen, zeigten eine signifikant niedrigere Inzidenz für URTIs oder GI-Symptome insgesamt. Nicht signifikant waren die URTI- und GI-Symptome-Inzidenz allein betrachtet. Die Gruppen unterschieden sich ebenfalls nicht in Schwere und Dauer der Erkrankungen. Die Inzidenz für andere Symptome als GI- oder URTI-Symptome war unter Spielern, die Probiotika einnahmen signifikant niedriger.
Kekkonen et al., 2007	119 Marathonläufer*innen: 22–69 Jahre	Tägliche Einnahme von <i>Lactobacillus rhamnosus</i> (LGG), Form: Milchgetränk oder Kapseln Dosis: Getränk: mind. 4×10^{10} KBE/Tag; Kapseln:	Placebo	Indirekte Parameter: Erythrozyten: ↔ GI-Dauer: ↔ GI-Häufigkeit: ↔ Hämatokrit: ↔ Hämoglobin: ↔ IL-6: ↔	Die Probiotika-Gruppe zeigte keine signifikanten Effekte der Einnahme auf Häufigkeit, Dauer oder Schwere von Atemwegsinfekten und gastro-intestinalen Symptomen.

		mind. 1×10^{10} KBE/Tag, Dauer: 3 Monate		Krankheitstage: ↔ MCH: ↔ MCHC: ↔ MCV: ↑ URTI-Dauer: ↔ URTI-Häufigkeit: ↔	IL-6 und die Blutparameter der Sauerstofftransportkapazität blieben auch unverändert. Das Erythrozytenvolumen vergrößerte sich im Mittel bei Athlet*innen mit Probiotika-Einnahme.
Lennon et al., 2024	16 ambitionierte Freizeit-Läufer*innen: 8 ♂, 8 ♀, $32,7 \pm 8$ Jahre, mit häufig auftretenden GI-Symptomen während/nach dem Laufen	Tägliche Einnahme eines Probiotika-Präparats mit <i>Pediococcus acidilactici</i> und zwei <i>Lactobacillus plantarum</i> -Stämmen (1:1:1), Form: Kapseln Dosis: 3×10^9 KBE/Tag, Dauer: 4 Wochen	Placebo	Direkte Parameter: Zeit bis zur Erschöpfung ↔ Indirekte Parameter: BCFA ↔ CRP ↔ GI-Beschwerden ↔ Mikrobiom-Diversität: ↔ SCFA ↔ Zonulin ↔ Zytokine ↔	Keine signifikanten Unterschiede der Veränderungen der untersuchten indirekten und direkten Parameter zwischen Interventions- und Kontrollgruppe
Li et al. 2023	15 männliche Profi-Athleten im Ski-Langlauf: $19,4 \pm 0,9$ Jahre	Tägliche Einnahme von <i>Bifidobacterium animalis</i> subsp. <i>Lactis</i> (BL-99), Form: angereicherter Joghurt, Dosis: 4×10^9 KBE/Tag, Dauer: 8 Wochen	Placebo	Direkte Parameter: VO2max: ↑ Indirekte Parameter: <i>Bifidobacterium animalis</i> : ↑ Diversität des Mikrobioms: ↔ Kniebeuger-Kraft bei 180°/s: ↔ Kniebeuger-Kraft bei 60°/s: ↔ Kniestrecker-Kraft bei 180°/s: ↔ Kniestrecker-Kraft bei 60°/s: ↑ PUFA: DHA: ↑ PUFA: Docosatetraensäure: ↑ PUFAs (sonstige): ↔ SCFA: Essigsäure: ↑ SCFAs (sonstige): ↔	Bei Ski-Langläufern, die täglich probiotika-angereicherten Joghurt einnahmen, steigerte sich die VO2max signifikant. Das eingenommene Probiotikum war signifikant nachweisbar. Die Diversität des Mikrobioms veränderte sich insgesamt nicht. Die Maximalkraft des Kniestreckers wurde signifikant bei Probiotika-Einnahme gesteigert. Essigsäure und Docosatetraensäure stiegen signifikant an, andere SCFAs und PUFAs blieben unverändert.

McDer-mott et al., 2024	28 ambitionierte Ausdauerläufer*innen: 18–45 Jahre, VO2max: 60.–85. Perzentile)	Tägliche Einnahme eines Probiotika-Präparats mit <i>Lactobacillus helveticus</i> Lafti L10, Form: Kapseln, Dosis: 5×10^9 KBE/Tag, Dauer: 6 Wochen	Placebo	Direkte Parameter: Zeit bis zur Erschöpfung: ↔ Indirekte Parameter: Cortisol: ↔ GI-Symptome: ↔ Krankheitstage: ↔ Laktat: ↔ RPE (Wahrgenommene Anstrengung): ↑ SIgA: ↔	Die Einnahme von Probiotika führte zu keinen Veränderungen der Zeit bis zur Erschöpfung, GI-Symptomen, Krankheitstagen, Laktat-, SIgA- und Cortisol-Spiegeln. Die wahrgenommene Anstrengung (RPE) war in der Probiotikagruppe signifikant erhöht.
Smar-kusz-Zarzecka et al., 2022	66 Langstrecken-Läufer*innen: $38,5 \pm 8,6$ Jahre	Tägliche Einnahme eines Probiotika-Präparats mit u. a. <i>Lactobacillus casei</i> W56, <i>Lactococcus lactis</i> W19 und <i>Bifidobacterium bifidum</i> W23, Form: Kapseln Dosis: $2,5 \times 10^9$ KBE/Tag Dauer: 3 Monate	Placebo	Indirekte Parameter: Gesundheit, subjektiv: ↔ GI-Symptome: ↔ HDL-Cholesterin: ♀ ↑, ♂ ↔ LDL-Cholesterin: ↔	Nach 3-monatiger Intervention zeigten sich im Vergleich zur Kontrollgruppe keine signifikanten Änderungen der GI-Symptome und des subjektiv wahrgenommenen Gesundheitszustandes. LDL-Cholesterin blieb ebenfalls unverändert. Die HDL-Spiegel veränderten sich nur signifikant bei Athletinnen, die Probiotika einnahmen, nicht bei den männlichen Läufern.
Strasser et al., 2016	29 Freizeit-Athlet*innen: $13\text{♂}, 16\text{♀}$, $26,1 \pm 3,5$ Jahre, VO2max: $51,2 \pm 7,7$ ml/kg/min	Tägliche Einnahme eines Probiotika-Multistamm-Präparats mit u. a. <i>Bifidobacterium bifidum</i> W23 und <i>Lactococcus lactis</i> W58 Form: keine Angabe Dosis: 1×10^{10} KBE/Tag, Dauer: 3 Monate	Placebo	Direkte Parameter: VO2max: ↔ Indirekte Parameter: URTI-Inzidenz: ↓	Athlet*innen, die das Probiotika- Multistamm-Präparat einnahmen, zeigten eine niedrigere Inzidenz von Erkrankungen der oberen Atemwege. Keine signifikante Veränderung der VO2max konnte im Vergleich zu den Athlet*innen der Placebo-Gruppe festgestellt werden.

*mit Relevanz für die Beantwortung der Forschungsfrage

Legende:

↑: signifikante Erhöhung im Vergleich zur Kontrollgruppe ($p < 0,05$)

↓: signifikante Verringerung im Vergleich zur Kontrollgruppe ($p < 0,05$)

↔: keine signifikante Veränderung im Vergleich zur Kontrollgruppe ($p \geq 0,05$)

CMV: Cytomegalovirus

EBV: Epstein-Barr-Virus

GI: gastro-intestinale Symptome

KBE: kolonienbildende Einheiten

MCV = mittleres korpuskuläres Volumen (durchschnittliche Größe der roten Blutkörperchen)

MCH = mittleres korpuskuläres Hämoglobin (durchschnittliche Hämoglobinmenge pro rotem Blutkörperchen)

MCHC = mittlere korpuskuläre Hämoglobinkonzentration (durchschnittliche Hämoglobinkonzentration innerhalb der roten Blutkörperchen)

PUFA: mehrfach ungesättigte Fettsäuren

URS: upper respiratory symptoms (deutsch: Symptome der oberen Atemwege)

URTI: upper respiratory tract infection (deutsch: Infektion der oberen Atemwege)

5.2. Effekte auf direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit

Unter direkten Parametern der Ausdauer-Leistungsfähigkeit werden in dieser Arbeit Messgrößen verstanden, die unmittelbar die körperliche Leistungsgrenze im Ausdauersport widerspiegeln. Dazu zählen die VO₂max und die Zeit bis zur Erschöpfung bei konstanter Belastung. Diese Parameter gelten, neben weiteren, in der Sportwissenschaft als objektive Indikatoren der Ausdauerleistungsfähigkeit und wurden in einigen der in diese Arbeit eingeschlossenen Interventionsstudien eingesetzt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studien in Bezug auf diese direkten Parameter dargestellt.

5.2.1. VO₂max

Als direkter Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit wurde die VO₂max in drei der eingeschlossenen Studien gemessen. Die Ergebnisse sind heterogen.

Cox et al. kamen in ihrer randomisierten kontrollierten Crossover-Studie zu dem Ergebnis, dass sich die VO₂max von Athleten nach vier Wochen sowohl unter Probiotika-Einnahme als auch Placebo-Einnahme erhöht hatte. Der Anstieg der Interventionsgruppe war etwas höher, jedoch ohne Signifikanz. Der Trainingsumfang in beiden Gruppen unterschied sich im Untersuchungszeitraum nicht signifikant.

Über acht Wochen nahmen Ski-Langlauf-Athlet*innen in der Studie von Li et al. ein Probiotika- oder Placebo-Präparat ein. Zu Beginn und am Ende des Zeitraums wurde unter anderem die VO₂max gemessen. Es resultierte eine Verbesserung bei den Athlet*innen mit Probiotika-Einnahme, die signifikant höher war als die Verbesserung in der Kontroll-Kohorte. Auch hier lagen im Trainingsumfang keine signifikanten Differenzen der beiden Gruppen vor.

Die Probiotika-Kohorte in der Studie von Strasser et al. wies ein signifikant höheres Trainingsvolumen während der Intervention im Vergleich zur Kontrollgruppe auf. Auch unterschied sich die VO₂max zwischen den Gruppen zu Beginn signifikant und war bei den Athlet*innen der Probiotikagruppe höher. Nach drei Monaten bestand die signifikante Differenz der VO₂max weiterhin, die Werte blieben aber in beiden Gruppen weitgehend unverändert.

5.2.2. Zeit bis zur Erschöpfung

Ebenfalls drei Studien verwendeten die Zeit bis zur Erschöpfung als direkten Parameter, um die Leistungsfähigkeit von Athlet*innen zu messen und zu vergleichen. Dabei kamen die drei Arbeiten zu dem Ergebnis, dass keine signifikante Verbesserung im Vergleich zur Kontrollgruppe erzielt wurden.

Die einzige eingeschlossene Studie, die als Parameter die VO₂max und zugleich die Zeit bis zur Erschöpfung ermittelte, ist die Arbeit von Cox et al.. Es erhöhte sich die Zeit bis zur Erschöpfung in beiden Kohorten gering und in der Probiotikagruppe etwas mehr als in der Kontrollgruppe, jedoch nicht signifikant.

2024 veröffentlichten Lennon et al. eine Studie, die sowohl die Sicherheit als auch die Wirkung eines Probiotika-Präparates bei Läufer*innen über drei Monate untersuchte. Als direkter Ausdauer-Leistungsparameter wurde dabei die Zeit bis zur Erschöpfung gemessen. Im Durchschnitt wiesen weder die Athlet*innen, die das Probiotika-Präparat einnahmen, noch die, die ein Placebo erhielten, Verbesserungen ihrer Zeit bis zur Erschöpfung auf.

In der Untersuchung von McDermott ergab sich nach sechs Wochen eine Verringerung der Zeit bis zur Erschöpfung unter den Personen, die das Placebo-Präparat erhielten. Die Athlet*innen der Probiotika-Gruppe zeigten nach der Intervention keine Veränderung ihrer Zeit bis zur Erschöpfung. Die Differenz der Endresultate beider Gruppen ist signifikant.

5.3. Effekte auf indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit

5.3.1. Immunsystem und gesundheitliche Beschwerden

Als indirekte Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit werden von den eingeschlossenen Studien vor allem gastro-intestinale Beschwerden wie Durchfälle oder Bauchschmerzen und Atemwegserkrankungen sowie deren Symptome herangezogen. Die Resultate diesbezüglich sind uneinheitlich.

Cox et al. wiesen signifikant weniger Tage mit Krankheitssymptomen bei Probanden nach, die ein Probiotikum einnahmen. Die Häufigkeit von auftretenden Erkrankungen sowie deren Schwere unterschied sich nicht signifikant zwischen Kontroll- und Interventionskohorte. Die Krankheitsschwere unterschied sich bei den Athleten mit Probiotika-Präparat jedoch von jener der Kontrollgruppe nahe der Signifikanz. Die Immunglobuline sIgA und IgA1 wurden ebenfalls bestimmt und unterschieden sich nach der Intervention nicht zwischen Probiotika- und Placebo-Gruppe.

Gleeson et al. untersuchten in ihrer Studie aus dem Jahr 2010 die Wirkung von Probiotika im Winter. Es wurden gastro-intestinale Beschwerden (GI) sowie Infektionen der oberen Atemwege (URTI) als Parameter genutzt. Für beides zeigte sich ein signifikanter Unterschied der Erkrankungsprävalenz zugunsten der Athlet*innen, die Probiotika einnahmen. Die Inzidenz war jedoch nur für URTIs in der Probiotika-Kohorte signifikant niedriger. Bezuglich gastro-intestinaler Symptome unterschied sie sich nicht. Bei aufgetretenen URTIs und GI unterschieden sich Dauer und Schwere nicht. Eine im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikante Erhöhung von sIgA wurde nach der Probiotika-Intervention festgestellt.

Zwei Jahre später veröffentlichte Gleeson mit Kolleg*innen wiederum eine Studie, die während der Winter-/Frühjahrssaison keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf sIgA und Atemwegsinfekte zeigte. Letztere unterschieden sich in ihrer Inzidenz und Dauer nicht zwischen Athlet*innen mit und ohne Probiotika-Einnahme. Die Proband*innen mit und ohne Probiotika nahmen zudem gleich oft medizinische Maßnahmen bei Erkrankungen in Anspruch.

Sportler*innen, die ein fermentiertes Milchgetränk mit *Lactobacillus casei* Shirota zu sich nahmen, zeigten in einer weiteren Studie von Gleeson et al. (2016) keine signifikant veränderte Inzidenz, Schwere und Dauer von Symptomen in Bezug auf Atemwegserkrankungen gegenüber der Kontrollgruppe. Auch Trainingseinheiten fielen nicht seltener oder häufiger bei Probiotika-Einnahme aus. Die Studie fand bei Athlet*innen mit nachweisbaren IgG-Antikörpern gegen das Epstein-Barr- sowie Cytomegalovirus einen signifikanten Rückgang der Werte nach Probiotika-Intervention im Vergleich zur Kontrollgruppe vor.

Bei professionellen Rugby-Spielern, die Probiotika nahmen, traten Atemwegsinfekte sowie gastro-intestinale Beschwerden nicht signifikant seltener auf. Gemeinsam betrachtet blieben jedoch signifikant mehr Spieler mit Probiotika- im Vergleich zu denen mit Placebo-Einnahme, von beiden Erkrankungen befreit. Die Inzidenz von Symptomen, die nicht grippe-, augen- oder hautbezogen waren, traten in der Interventionsgruppe ebenfalls signifikant geringer auf. Auch in dieser Studie von Haywood et al. lag keine Signifikanz in den Unterschieden der Krankheitsschwere oder -dauer zwischen beiden Gruppen vor.

Keine signifikanten Unterschiede der Häufigkeit oder Dauer von URTIs und gastro-intestinalen Beschwerden zwischen Läufer*innen während des Marathontrainings, die *Lactobacillus rhamnosus* oder ein Placebo-Präparat einnahmen, konnte in der Arbeit von Kekkonen et al. festgestellt werden. Zwei Wochen nach dem Marathon dauerten gastro-intestinale Beschwerden in der Gruppe, die Probiotika einnahm, signifikant kürzer an.

Das Auftreten gastrointestinaler Beschwerden verglichen auch Lennon et al. 2024 und Smarkusz-Zarzecka et al. 2022 zwischen Läufer*innen mit und ohne täglicher Probiotika-Einnahme. Die Beschwerden unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Gruppen. Der subjektiv wahrgenommene eigene Gesundheitszustand wurde in der Studie von Smarkusz-Zarzecka et al. erfragt und unterschied sich ebenfalls nicht signifikant.

McDermott et al. konnten hinsichtlich des Immunsystems keine signifikanten Unterschiede zwischen der Probiotika- und der Kontrollgruppe feststellen. Es wurden sIgA, das Auftreten gastro-intestinaler Beschwerden und die Anzahl an Krankheitstagen als Parameter verwendet.

Atemwegsinfekte traten in der Arbeit von Strasser et al. bei Einnahme eines Probiotika-Multistamm-Präparats signifikant seltener auf als bei Athlet*innen, die kein Präparat einnahmen.

5.3.2. Inflammatorische Marker

Die eingeschlossenen Studien untersuchten inflammatorische Marker unterschiedlicher Arten: Zytokine als Signal- und Botenstoffe der Immunantwort, Zonulin als Indikator der intestinalen Barrierefunktion und CRP als systemischen Entzündungsmarker. Die Ergebnisse zeigen konsistent, dass sich

die Zytokin-Werte durch die Intervention in der Probiotika- und Kontrollgruppe nicht signifikant unterschieden. Zonulin und CRP wurden nur von einzelnen Studien untersucht.

Die unter Cox et al. untersuchten Zytokine der Langstreckenläufer unterschieden sich nach 4 Wochen nicht signifikant zwischen der Probiotika- und Placebogruppe. Es wurden IFN γ , IL-4 und IL-12 gemessen. IFN γ stieg unter Probiotika-Einnahme moderat an. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen war dabei nahe an einer signifikanten Differenz.

Ebenfalls IFN γ und zusätzlich IL1 β , IL-6, -8, -10 und TNF α verglichen Gleeson et al. (2012) zwischen der Probiotika- und Placebo-Kohorte und fanden keinen signifikanten Unterschied in den Veränderungen der Werte.

Bezüglich des Interleukin-6 kamen Kekkonen et al. zum gleichen Ergebnis ohne signifikante Differenz.

Lennon et al. verglichen die gleichen Parameter zwischen Interventions- und Kontrollgruppe. Die Veränderungen der Werte unterschieden sich in dieser Studie ebenfalls nicht signifikant. In der Kontrollgruppe war der IL-1 β -Wert nach vier Wochen niedriger als zuvor und in der Kontrollgruppe stieg der Wert an. Der Unterschied war nicht signifikant. Zusätzlich wurden Zonulin und das CRP gemessen. Ein CRP-Anstieg in der Placebo-Kohorte und ein leichtes Absinken des Wertes in der Probiotika-Kohorte wurden ohne signifikante Unterschiede beobachtet. Die Zonulin-Werte veränderten sich ebenfalls nicht signifikant.

5.3.3. Sonstige indirekte Parameter

In der Studie von Kekkonen et al. wurden neben den bereits aufgeführten Ergebnissen zusätzlich die Blutparameter zur Sauerstofftransportkapazität gemessen. Es lagen keine signifikanten Veränderungen der Erythrozytenzahl, des Hämoglobins und Hämatokrits vor. Auch der durchschnittliche Hämoglobingehalt und die -konzentration in den Erythrozyten blieb unverändert. Signifikant vergrößerte sich das mittlere Erythrozytenvolumen bei den Läufer*innen, die Probiotika einnahmen.

Von den eingeschlossenen Studien untersuchten ausschließlich Li et al. die Schnell- und Maximalkraft von Athletinnen. Die Intervention wurde bei Skilangläufern durchgeführt und umfasste Messungen der Kraft von Kniebeugern und -streckern bei Bewegungen mit 180°/s und 60°/s. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen zeigte sich nur in der Maximalkraftsteigerung des Kniestreckers zugunsten der Probiotika-Gruppe. Die Maximalkraft des Kniebeugers nahm in beiden Gruppen zu, jedoch nur in der Probiotika-Gruppe signifikant. Die Differenz zwischen den Gruppen war dabei nicht signifikant.

Zusätzlich analysierten Li et al. SCFAs und mehrfach ungesättigten Fettsäuren (PUFAs). Hier zeigte sich eine signifikante Erhöhung von Essigsäure und Docosatetraensäure, während alle weiteren

untersuchten Fettsäuren keine Unterschiede zwischen den Gruppen aufwiesen. Auch die Diversität des Darmmikrobioms blieb unverändert, allerdings lag nach Einnahme von *Bifidobacterium animalis* subsp. *Lactis* (BL-99) eine signifikant höhere Konzentration des Bakteriums im Darmmikrobiom vor.

Lennon et al. berichteten vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich Mikrobiom-Diversität und SCFAs. Darüber hinaus untersuchten sie Veränderungen der verzweigtkettigen Fettsäuren (BCFA), die ebenfalls ohne signifikante Unterschiede blieben.

6. Diskussion

Die eingeschlossenen Studien zeigen ein heterogenes Bild. Bei den direkten Parametern der Ausdauer-Leistungsfähigkeit wurden für die VO2max teils Verbesserungen nach Probiotika-Einnahme beobachtet, während die Zeit bis zur Erschöpfung überwiegend unbeeinflusst blieb. Auf indirekte Parameter wie Immunmarker, Atemwegsinfekte und gastrointestinale Beschwerden zeigten Probiotika in einzelnen Studien positive Effekte, insgesamt aber uneinheitlich. Entzündungsmarker und weitere untersuchte Größen wie SCFAs veränderten sich zumeist nicht signifikant.

6.1. Direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit

Die Ergebnisse zur VO2max unterscheiden sich zwischen den eingeschlossenen Studien. Sie wurde von drei Studien untersucht, wobei die Arbeit von Li et al. einen Zusammenhang zwischen täglicher Probiotika-Einnahme und einer VO2max-Steigerung zeigt. Die anderen Studien fanden keine signifikante Auswirkung von Probiotika auf diesen Parameter. Die drei Studien untersuchten unterschiedliche Probiotika über verschieden lange Zeiträume. Bei Li et al. nahmen die Teilnehmer*innen jeweils acht Wochen lang *Bifidobacterium animalis* ein. Cox et al. nutzten *Lactobacillus fermentum* über vier Wochen und Strasser et al. ein Multistamm-Präparat mit Bifidobacterium- und Lactobacillusstämmen in einer drei-monatigen Intervention. Die Stichproben der Arbeiten bestanden aus 16 bis 29 Personen, aufgeteilt in zwei Gruppen.

Die heterogene Gestaltung der Interventionen und die kleinen Stichproben können eine mögliche Erklärung der unterschiedlichen Ergebnisse zur VO2max darstellen. Ergänzend sei angemerkt, dass sich die VO2max bei Athlet*innen, wie im Kapitel 4.2. „Direkte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit“ erwähnt, individuell sehr unterschiedlich entwickelt. Gerade in Studien mit geringer Teilnehmerzahl besteht daher das Risiko, dass beobachtete Unterschiede zwischen Interventions- und Kontrollgruppen eher auf zufälligen individuellen Entwicklungen beruhen als auf der Probiotika-Einnahme selbst. Ebenso ist es möglich, dass tatsächliche Effekte der Supplementierung nicht sichtbar werden, weil sie durch die natürliche Streuung der VO2max-Werte überlagert werden. Durch ein Cross-Over-Studiendesign könnten sich Auswirkungen dieser Problematik verringern lassen, da in diesem Design jede Person ihre eigene Kontrolle ist. Im Gegensatz zu den übrigen Studien gestalteten

Li et al. ihre Studie tatsächlich im Cross-over-Design. Nach einer Washout-Phase wechselten die Proband*innen jeweils von Probiotika zu Placebo beziehungsweise umgekehrt. Dieses Vorgehen erhöht die Validität des beobachteten Effekts der VO₂max-Steigerung, den die anderen zwei Arbeiten nicht ergaben. Gleichwohl bleiben auch in dieser Arbeit methodische Einschränkungen bestehen. Auch aktuelle Übersichtsarbeiten weisen auf eine mögliche, aber nicht konsistente Wirkung von Probiotika auf die VO₂max hin; besonders die Heterogenität der Methodik wird dabei als Problem dargestellt (Aykut et al., 2024; Santibañez-Gutierrez et al., 2022).

Die Messungen der Zeit bis zur Erschöpfung ergaben in den drei eingeschlossenen Studien keine signifikanten Effekte durch Probiotika. Die Studien wiesen Stichproben von 16 bis 28 Proband*innen und Interventionen von 4 bis 6 Wochen mit unterschiedlichen Probiotika-Stämmen auf. Der Untersuchungszeitraum ist im Vergleich zu den weiteren in diese Arbeit eingeschlossenen Studien kurz. Die Meta-Analyse von Santibañez-Gutierrez et al. (2022) zeigt allerdings, dass kürzere Supplementationsdauern von ≤ 4 Wochen mit einem größeren Leistungseffekt assoziiert waren. Diese Ergebnisse stammen aus einer Subgruppenanalyse der Studie und weisen somit eine erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit auf, da sie durch kleine Stichproben oder Confounding verzerrt sein können.

Die Einschränkungen von Messungen der Zeit bis zur Erschöpfung bezüglich individueller Faktoren wie Motivation wurden bereits weiter oben geschildert und sollten bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Trotzdem zeigte eine Untersuchung von Alghannam et al. (2015) zur Wiederholbarkeit von Lauftests bis zur Erschöpfung, dass die Ergebnisse der Zeit bis zur Erschöpfung bei identischen Rahmenbedingungen sehr stabil ausfielen. Die Übereinstimmung zwischen zwei Testdurchgängen war hoch (Intraclass Correlation Coefficient (= 0,88)) und die Varianz zwischen den Messungen gering (CV $\sim 5,4\%$) (Alghannam et al., 2015). Unter standardisierten Bedingungen kann die Zeit bis zur Erschöpfung als Marker der Ausdauerleistung dienen. Gleichzeitig bleibt die Aussagekraft durch die Abhängigkeit von Motivation eingeschränkt.

6.2. Indirekte Parameter der Ausdauer-Leistungsfähigkeit

Die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien deuten darauf hin, dass Probiotika nur begrenzte und inkonsistente Effekte auf gastrointestinale Beschwerden bei Athlet*innen haben. Während die Arbeit von Cox et al. (2010) eine Reduktion der Krankheitstage beobachtete, ergaben die meisten der anderen Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede der GIs zwischen Probiotika- und Kontrollgruppe. Ein aktuelles systematisches Review sowie eine Meta-Analyse kamen ebenfalls zu solchen inkonsistenten Ergebnissen. Einige der dort herangezogenen Studien zeigten moderate positive Effekte auf gastrointestinale Beschwerden, die Nachhaltigkeit der Effekte blieb jedoch begrenzt. Die Heterogenität hinsichtlich der Probiotika-Stämme und Dosierung, des Studiendesign sowie der Dauer und Population erschwert auch hier eindeutige Schlussfolgerungen. Zudem wurden potenzielle Confoundings wie Ernährung, Trainingsstatus und Mikrobiom-Zusammensetzung häufig nicht

ausreichend kontrolliert (Aitkenhead et al., 2025; Virmond Taques Andreoli, Zampiér Ulrich & Labronici Bertin, 2025).

Für Atemwegsinfekte zeigen die Ergebnisse ein ähnlich uneinheitliches Bild. Gleeson et al. (2010) und Strasser et al. (2016) berichten über eine reduzierte Inzidenz von URTIs unter Probiotika-Einnahme, während andere Arbeiten, wie Gleeson et al. (2012, 2016) oder Kekkonen et al. (2007), keine signifikanten Effekte auf Inzidenz, Dauer oder Schwere der Symptome fanden. Systematische Reviews aus den letzten Jahren bestätigen, dass Probiotika die Inzidenz und Schwere von Atemwegserkrankungen potenziell reduzieren können, die Effekte jedoch stark von Studiendesign, Trainingsstatus und verwendeten Stämmen abhängen (Teglas & Radak, 2025). Die Vergleichbarkeit der Studien wird durch die hohe Heterogenität der Protokolle eingeschränkt. Faktoren wie Trainingsintensität, Umweltbedingungen, Seropositivität oder individuelle Immunantworten wurden nicht immer berücksichtigt.

Die Wirkung von Probiotika auf Immunparameter zeigt ebenfalls inkonsistente Resultate. Während Gleeson et al. (2010) über einen Anstieg des Speichel-sIgA berichteten, fanden Cox et al. (2010), Gleeson et al. (2012) und McDermott et al. (2024) keine signifikanten Unterschiede für sIgA, IgA1 oder Zytokine. Bei seropositiven Athlet*innen konnte Gleeson et al. (2016) einen Rückgang von CMV- und EBV-IgG-Titern beobachten. Systematische Reviews und Meta-Analysen der letzten Jahre zeigen, dass Probiotika die Immunantwort nach intensivem Training modulieren können; Effekte auf einzelne Zytokine wie IL-10 werden zwar beobachtet, die Ergebnisse sind jedoch insgesamt inkonsistent (Aparicio-Pascual et al., 2025). Unterschiede in den Studienprotokollen, Stämmen, Dosierungen und populationsspezifischen Faktoren erschweren auch hier eindeutige Aussagen. Zudem sind die meisten Effekte wie auf sIgA vor allem punktuell und nicht über alle Marker hinweg konsistent.

Die untersuchten Fettsäureprofile der Athlet*innen zeigten nur für Essigsäure und Docosatetraensäure signifikante Veränderungen. Das könnte auf eine veränderte mikrobielle Fermentationsaktivität hindeuten, wenngleich man beachten muss, dass nur eine der einbezogenen Studien zu diesem Ergebnis kam. Die konkrete Bedeutung für die Leistungsfähigkeit von Ausdauersportler*innen ist bislang unzureichend belegt, deutet jedoch auf mögliche Vorteile in Bezug auf Entzündungen und oxidativen Stress hin (Santos de Sousa Fernandes et al., 2024).

Die Beobachtung einer gesteigerten Abundanz einzelner Bakterienstämme, bei gleichbleibender Diversität des Mikrobioms, zeigt zudem, dass sich probiotische Effekte eher in spezifischen Anpassungen als in globalen Verschiebungen der Mikrobiota manifestierten. Diese selektiven Veränderungen stimmen mit bisherigen Studien überein, die ebenfalls keine Veränderung der Mikrobiom-Diversität, jedoch einen Anstieg einzelner Stämme berichten (Olbricht et al., 2022).

Die Ergebnisse zu den hämatologischen Parametern zeigen, dass die Supplementierung mit Probiotika keinen Einfluss auf klassische Marker der Sauerstofftransportkapazität wie Erythrozytenzahl, Hämoglobin oder Hämatokrit hatte. Das signifikant erhöhte mittlere Erythrozytenvolumen könnte auf eine Verschiebung in der Zusammensetzung der Erythrozytenpopulation hindeuten, aber ohne weitere Studien dazu, lassen sich noch keine Aussagen über solche potenziellen Effekte durch Probiotika treffen.

Auch im Bereich der Muskelkraft zeigen die Ergebnisse der einbezogenen Studien ein heterogenes Bild. Während die Einnahme von Probiotika mit einer signifikanten Steigerung der Maximalkraft des Kniestreckers verbunden war, konnten vergleichbare Effekte bei den Kniebeugern nicht nachgewiesen werden. Ohne weitere Ergebnisse aus anderen Studien, sind diese Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren. Weitere Studien werden daher benötigt, um mögliche Effekte von Probiotika auf die Muskelkraft von Athlet*innen zu untersuchen.

6.3. Geschlechterspezifische Unterschiede

Die untersuchten Gruppen von Athlet*innen setzen sich in den einbezogenen Studien entweder nur aus Männern oder aus Frauen und Männern zusammen. Bis auf die Studie von Smarkusz-Zarzecka et al. (2022) betrachtet keine weitere, ob und wie sich die Effekte der Probiotika zwischen Männern und Frauen unterscheiden. Die Ergebnisse der Studie zeigten unterschiedliche Veränderungen der Cholesterinwerte zwischen Frauen und Männern. Aktuelle Studien geben Hinweise darauf, dass auch Probiotika geschlechtsspezifische Effekte haben können. Als mögliche Ursachen werden Unterschiede in der hormonellen Regulation, geschlechtsspezifische Immunantworten sowie eine unterschiedliche Zusammensetzung des Darmmikrobioms diskutiert, die die Aufnahme und Wirkung von Probiotika beeinflussen können (Santos-Marcos et al., 2023). Santibañez-Gutierrez et al. (2022) zeigten, dass Männer in Studien mehr oder stärkere Effekte auf Probiotika aufwiesen als Kohorten mit Männern und Frauen oder nur Frauen. Eine randomisierte kontrollierte Studie erzielte zudem das Ergebnis, dass Probiotika bei Männern unter anderem mehr immunregulatorische Effekte hervorriefen (C.-S. Kim et al., 2023). Zukünftige Untersuchungen sollten deshalb geschlechtsspezifische Unterschiede systematisch erfassen und bereits in der Studienplanung berücksichtigen, um verlässliche Aussagen zu differenzierten Effekten von Probiotika auf die Ausdauerleistungsfähigkeit treffen zu können.

7. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend zeigt sich, dass Probiotika in einzelnen Studien positive Effekte auf direkte und indirekte Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit aufweisen können, die Gesamtergebnisse jedoch heterogen und inkonsistent bleiben. Für die VO₂max deuten sich mögliche Verbesserungen an, während die Zeit bis zur Erschöpfung überwiegend unbeeinflusst bleibt. Auch indirekte Parameter wie

gastrointestinale Beschwerden, Atemwegsinfekte und immunologische Marker zeigen teilweise positive Wirkungen, die jedoch ebenfalls uneinheitlich bleiben. Die geringe Stichprobengröße vieler Studien sowie methodische Unterschiede schränken die Vergleichbarkeit zudem ein. Auf Basis der aktuellen Evidenz kann ein potenzieller Nutzen von Probiotika für die Ausdauerleistungsfähigkeit daher nicht ausgeschlossen werden, eindeutige Aussagen lassen sich jedoch nicht treffen. Zukünftige Forschung sollte größere Stichproben, standardisierte Interventionsprotokolle sowie geschlechtsspezifische Analysen berücksichtigen, um die Wirksamkeit und Relevanz für Athlet*innen fundiert zu bewerten.

8. Literaturverzeichnis

Agrawal, A., & Wu, Y. (2024). Editorial: Biology of C-reactive protein. *Frontiers in Immunology*, 15, 1445001. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1445001>

Aitkenhead, R., Waldron, M., Conway, G. E., Horner, K., & Heffernan, S. M. (2025). The Influence of Dietary Supplements on Exercise-Induced Gut Damage and Gastrointestinal Symptoms: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*, 17(3), 443. <https://doi.org/10.3390/nu17030443>

Alghannam, A., Jedrzejewski, D., Tweddle, M., Gribble, H., Bilzon, J., & Betts, J. (2015). Reliability of Time to Exhaustion Treadmill Running as a Measure of Human Endurance Capacity. *International Journal of Sports Medicine*, 37(03), 219–223. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1555928>

Ament, W., & Verkerke, G. J. (2009). Exercise and Fatigue: *Sports Medicine*, 39(5), 389–422. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939050-00005>

Aparicio-Pascual, D., Clemente-Suárez, V. J., Tornero-Aguilera, J. F., & Rubio-Zarapuz, A. (2025). The Effect of Probiotic Supplementation on Cytokine Modulation in Athletes After a Bout of Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine - Open*, 11(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00860-7>

Araújo, C. G. S., & Scharhag, J. (2016). Athlete: A working definition for medical and health sciences research. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(1), 4–7. <https://doi.org/10.1111/sms.12632>

Axling, U., Önning, G., Combs, M. A., Bogale, A., Högström, M., & Svensson, M. (2020). The Effect of Lactobacillus plantarum 299v on Iron Status and Physical Performance in Female Iron-Deficient Athletes: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients*, 12(5), 1279. <https://doi.org/10.3390/nu12051279>

Aykut, M. N., Erdoğan, E. N., Çelik, M. N., & Gürbüz, M. (2024). An Updated View of the Effect of Probiotic Supplement on Sports Performance: A Detailed Review. *Current Nutrition Reports*, 13(2), 251–263. <https://doi.org/10.1007/s13668-024-00527-x>

Azad, Md. A. K., Sarker, M., Li, T., & Yin, J. (2018). Probiotic Species in the Modulation of Gut Microbiota: An Overview. *BioMed Research International*, 2018, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2018/9478630>

Baker, L. H., Desai, T., Green, M., & Wells, A. V. (2024). Immunosurveillance associated with upper respiratory symptoms in elite swimmers: The 8-month period leading into Commonwealth Games. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 27(3), 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2023.11.011>

Barte, J. C. M., Nieuwenhuys, A., Geurts, S. A. E., & Kompier, M. A. J. (2019). Motivation counteracts fatigue-induced performance decrements in soccer passing performance. *Journal of Sports Sciences*, 37(10), 1189–1196. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1548919>

Baskerville, R., Castell, L., & Bermon, S. (2024). Sports and Immunity, from the recreational to the elite athlete. *Infectious Diseases Now*, 54(4), 104893. <https://doi.org/10.1016/j.idnow.2024.104893>

Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(1), 70. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012>

Bermúdez-Humarán, L. G., Chassaing, B., & Langella, P. (2024). Exploring the interaction and impact of probiotic and commensal bacteria on vitamins, minerals and short chain fatty acids metabolism. *Microbial Cell Factories*, 23(1), 172. <https://doi.org/10.1186/s12934-024-02449-3>

Brenner, D. R., Scherer, D., Muir, K., Schildkraut, J., Boffetta, P., Spitz, M. R., Le Marchand, L., Chan, A. T., Goode, E. L., Ulrich, C. M., & Hung, R. J. (2014). A Review of the Application of Inflammatory Biomarkers in Epidemiologic Cancer Research. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 23(9), 1729–1751. <https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-14-0064>

Camilleri, M. (2019). Leaky gut: Mechanisms, measurement and clinical implications in humans. *Gut*, 68(8), 1516–1526. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2019-318427>

Campa, F., & Coratella, G. (2021). Athlete or Non-athlete? This Is the Question in Body Composition. *Frontiers in Physiology*, 12, 814572. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.814572>

Chu, H., & Mazmanian, S. K. (2013). Innate immune recognition of the microbiota promotes host-microbial symbiosis. *Nature Immunology*, 14(7), 668–675. <https://doi.org/10.1038/ni.2635>

De Oliveira, E. P., Burini, R. C., & Jeukendrup, A. (2014). Gastrointestinal Complaints During Exercise: Prevalence, Etiology, and Nutritional Recommendations. *Sports Medicine*, 44(S1), 79–85. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0153-2>

Derman, W., Badenhorst, M., Eken, M., Gomez-Ezeiza, J., Fitzpatrick, J., Gleeson, M., Kunorozva, L., Mjosund, K., Mountjoy, M., Sewry, N., & Schwellnus, M. (2022). Risk factors associated with acute respiratory illnesses in athletes: A systematic review by a subgroup of the IOC consensus on ‘acute respiratory illness in the athlete’. *British Journal of Sports Medicine*, 56(11), 639–650. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2021-104795>

Di Dio, M., Calella, P., Pelullo, C. P., Liguori, F., Di Onofrio, V., Gallè, F., & Liguori, G. (2023). Effects of Probiotic Supplementation on Sports Performance and Performance-Related Features in Athletes: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2226. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032226>

Edwards, K. H., Ahuja, K. D., Watson, G., Dowling, C., Musgrave, H., Reyes, J., Cherry, J., & Kitic, C. M. (2021). The influence of exercise intensity and exercise mode on gastrointestinal damage. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 46(9), 1105–1110. <https://doi.org/10.1139/apnm-2020-0883>

Fasano, A. (2020). All disease begins in the (leaky) gut: Role of zonulin-mediated gut permeability in the pathogenesis of some chronic inflammatory diseases. *F1000Research*, 9, 69. <https://doi.org/10.12688/f1000research.20510.1>

Faude, O., & Donath, L. (2023). Ausdauer und Ausdauertraining im Sport: Anwendungsbereiche, Diagnostik, Trainingsformen, Organisation, Methoden, Anpassungen. In A. GÜLICH & M. KRÜGER (Hrsg.), *Bewegung, Training, Leistung und Gesundheit* (S. 849–864). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53410-6_47

Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate Threshold Concepts: How Valid are They? *Sports Medicine*, 39(6), 469–490. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>

France, M. M., & Turner, J. R. (2017). The mucosal barrier at a glance. *Journal of Cell Science*, 130(2), 307–314. <https://doi.org/10.1242/jcs.193482>

Goswami, T. K., Singh, M., Dhawan, M., Mitra, S., Emran, T. B., Rabaan, A. A., Mutair, A. A., Alawi, Z. A., Alhumaid, S., & Dhama, K. (2022). Regulatory T cells (Tregs) and their therapeutic potential against autoimmune disorders – Advances and challenges. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 18(1), 2035117. <https://doi.org/10.1080/21645515.2022.2035117>

Haller, D., Rimbach, G., & Grune, T. (2013). *Biofunktionalität der Lebensmittelinhaltstoffe*. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29374-0_21

Hariton, E., & Locascio, J. J. (2018). Randomised controlled trials – the gold standard for effectiveness research: Study design: randomised controlled trials. *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 125(13), 1716–1716. <https://doi.org/10.1111/1471-0528.15199>

Hitch, T. C. A., Hall, L. J., Walsh, S. K., Leventhal, G. E., Slack, E., De Wouters, T., Walter, J., & Clavel, T. (2022). Microbiome-based interventions to modulate gut ecology and the immune system. *Mucosal Immunology*, 15(6), 1095–1113. <https://doi.org/10.1038/s41385-022-00564-1>

Inoue, A., Lattari, E., Carmo, E. C., Oliveira, B. R. R., Silva, E. B., & Santos, T. M. (2023). Reliability of Time to Exhaustion Above the Power Output at VO₂peak in Trained Mountain Bikers. *International Journal of Exercise Science*, 16(4), 654–664.
<https://doi.org/10.70252/NBYJ5810>

Jäger, R., Mohr, A. E., Carpenter, K. C., Kerksick, C. M., Purpura, M., Moussa, A., Townsend, J. R., Lamprecht, M., West, N. P., Black, K., Gleeson, M., Pyne, D. B., Wells, S. D., Arent, S. M., Smith-Ryan, A. E., Kreider, R. B., Campbell, B. I., Bannock, L., Scheiman, J., ... Antonio, J. (2019). International Society of Sports Nutrition Position Stand: Probiotics. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 16(1), 62.
<https://doi.org/10.1186/s12970-019-0329-0>

Johansen, J. M., Støa, E. M., Sunde, A., Rønnestad, B. R., Helgerud, J., & Støren, Ø. (2025). Elite Aerobic Endurance Performance: Is It Really Related to Lactate Threshold Expressed Relative to Peak Oxygen Uptake? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 20(6), 875–879. <https://doi.org/10.1123/ijsspp.2024-0528>

Jorgovanovic, D., Song, M., Wang, L., & Zhang, Y. (2020). Roles of IFN- γ in tumor progression and regression: A review. *Biomarker Research*, 8(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s40364-020-00228-x>

Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: The physiology of champions. *The Journal of Physiology*, 586(1), 35–44. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.143834>

Kany, S., Vollrath, J. T., & Relja, B. (2019). Cytokines in Inflammatory Disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(23), 6008. <https://doi.org/10.3390/ijms20236008>

Keegan, A. D., Leonard, W. J., & Zhu, J. (2021). Recent advances in understanding the role of IL-4 signaling. *Faculty Reviews*, 10. <https://doi.org/10.12703/r/10-71>

Kim, C.-S., Jung, M. H., Choi, E. Y., & Shin, D.-M. (2023). Probiotic supplementation has sex-dependent effects on immune responses in association with the gut microbiota in community-dwelling older adults: A randomized, double-blind, placebo-controlled, multicenter trial.

Nutrition Research and Practice, 17(5), 883–898.
<https://doi.org/10.4162/nrp.2023.17.5.883>

Kim, S., Seo, S.-U., & Kweon, M.-N. (2024). Gut microbiota-derived metabolites tune host homeostasis fate. *Seminars in Immunopathology*, 46(1–2), 2. <https://doi.org/10.1007/s00281-024-01012-x>

Li, L., Hong, K., Sun, Q., Xiao, H., Lai, L., Ming, M., & Li, C. (2020). Probiotics for Preventing Upper Respiratory Tract Infections in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2020(1), 8734140. <https://doi.org/10.1155/2020/8734140>

Li, X. V., Leonardi, I., & Iliev, I. D. (2019). Gut Mycobiota in Immunity and Inflammatory Disease. *Immunity*, 50(6), 1365–1379. <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2019.05.023>

Liu, X., Shao, J., Liao, Y.-T., Wang, L.-N., Jia, Y., Dong, P., Liu, Z., He, D., Li, C., & Zhang, X. (2023). Regulation of short-chain fatty acids in the immune system. *Frontiers in Immunology*, 14, 1186892. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1186892>

Lopez-Castejon, G., & Brough, D. (2011). Understanding the mechanism of IL-1 β secretion. *Cytokine & Growth Factor Reviews*, 22(4), 189–195. <https://doi.org/10.1016/j.cyto-gfr.2011.10.001>

Luis, A. S., & Hansson, G. C. (2023). Intestinal mucus and their glycans: A habitat for thriving microbiota. *Cell Host & Microbe*, 31(7), 1087–1100.
<https://doi.org/10.1016/j.chom.2023.05.026>

Mach, N., & Fuster-Botella, D. (2017). Endurance exercise and gut microbiota: A review. *Journal of Sport and Health Science*, 6(2), 179–197. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.05.001>

Maciel-Fiuza, M. F., Muller, G. C., Campos, D. M. S., Do Socorro Silva Costa, P., Peruzzo, J., Bonamigo, R. R., Veit, T., & Vianna, F. S. L. (2023). Role of gut microbiota in infectious and inflammatory diseases. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1098386.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1098386>

Martin-Rincon, M., & Calbet, J. A. L. (2020). Progress Update and Challenges on V.O2max Testing and Interpretation. *Frontiers in Physiology*, 11, 1070.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2020.01070>

Matsushima, K., Yang, D., & Oppenheim, J. J. (2022). Interleukin-8: An evolving chemokine. *Cytokine*, 153, 155828. <https://doi.org/10.1016/j.cyto.2022.155828>

Maughan, R. J., Burke, L. M., Dvorak, J., Larson-Meyer, D. E., Peeling, P., Phillips, S. M., Rawson, E. S., Walsh, N. P., Garthe, I., Geyer, H., Meeusen, R., van Loon, L. J. C., Shirreffs, S. M., Spriet, L. L., Stuart, M., Verne, A., Currell, K., Ali, V. M., Budgett, R. G., ... Engebretsen, L. (2018). IOC consensus statement: Dietary supplements and the high-performance athlete. *British Journal of Sports Medicine*, 52(7), 439–455.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099027>

Mercogliano, M. F., Bruni, S., Mauro, F., Elizalde, P. V., & Schillaci, R. (2021). Harnessing Tumor Necrosis Factor Alpha to Achieve Effective Cancer Immunotherapy. *Cancers*, 13(3), 564.
<https://doi.org/10.3390/cancers13030564>

Meyler, S., Bottoms, L., & Muniz-Pumares, D. (2021). Biological and methodological factors affecting response variability to endurance training and the influence of exercise intensity prescription. *Experimental Physiology*, 106(7), 1410–1424.
<https://doi.org/10.1113/EP089565>

Mohr, A. E., Jäger, R., Carpenter, K. C., Kerksick, C. M., Purpura, M., Townsend, J. R., West, N. P., Black, K., Gleeson, M., Pyne, D. B., Wells, S. D., Arent, S. M., Kreider, R. B., Campbell, B. I., Bannock, L., Scheiman, J., Wissent, C. J., Pane, M., Kalman, D. S., ... Antonio, J. (2020). The athletic gut microbiota. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 17(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00353-w>

Odenwald, M. A., & Turner, J. R. (2017). The intestinal epithelial barrier: A therapeutic target? *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 14(1), 9–21.
<https://doi.org/10.1038/nrgastro.2016.169>

Olbricht, H., Twadell, K., Sandel, B., Stephens, C., & Whittall, J. B. (2022). Is There a Universal Endurance Microbiota? *Microorganisms*, 10(11), 2213. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112213>

Paone, P., & Cani, P. D. (2020). Mucus barrier, mucins and gut microbiota: The expected slimy partners? *Gut*, 69(12), 2232–2243. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2020-322260>

Patel, B. K., Patel, K. H., Lee, C. N., & Moothala, S. (2024). Intestinal Microbiota Interventions to Enhance Athletic Performance—A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(18), 10076. <https://doi.org/10.3390/ijms251810076>

Pietrzak, B., Tomela, K., Olejnik-Schmidt, A., Mackiewicz, A., & Schmidt, M. (2020). Secretory IgA in Intestinal Mucosal Secretions as an Adaptive Barrier against Microbial Cells. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(23), 9254. <https://doi.org/10.3390/ijms21239254>

Portincasa, P., Bonfrate, L., Vacca, M., De Angelis, M., Farella, I., Lanza, E., Khalil, M., Wang, D. Q.-H., Sperandio, M., & Di Ciaula, A. (2022). Gut Microbiota and Short Chain Fatty Acids: Implications in Glucose Homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1105. <https://doi.org/10.3390/ijms23031105>

Rahman, S., O'Connor, A. L., Becker, S. L., Patel, R. K., Martindale, R. G., & Tsikitis, V. L. (2023). Gut microbial metabolites and its impact on human health. *Annals of Gastroenterology*, 36(4), 360–368. <https://doi.org/10.20524/aog.2023.0809>

Reusser, M., Sousa, C. V., Villiger, E., Alvero Cruz, J. R., Hill, L., Rosemann, T., Nikolaidis, P. T., & Knechtle, B. (2021). Increased Participation and Decreased Performance in Recreational Master Athletes in “Berlin Marathon” 1974–2019. *Frontiers in Physiology*, 12, 631237. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.631237>

Sales, K. M., & Reimer, R. A. (2023). Unlocking a novel determinant of athletic performance: The role of the gut microbiota, short-chain fatty acids, and “biotics” in exercise. *Journal of Sport and Health Science*, 12(1), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.09.002>

Sánchez, B., Delgado, S., Blanco-Míguez, A., Lourenço, A., Gueimonde, M., & Margolles, A. (2017). Probiotics, gut microbiota, and their influence on host health and disease.

Molecular Nutrition & Food Research, 61(1), 1600240.
<https://doi.org/10.1002/mnfr.201600240>

Santibañez-Gutierrez, A., Fernández-Landa, J., Calleja-González, J., Delextrat, A., & Mielgo-Ayuso, J. (2022). Effects of Probiotic Supplementation on Exercise with Predominance of Aerobic Metabolism in Trained Population: A Systematic Review, Meta-Analysis and Meta-Regression. *Nutrients*, 14(3), 622. <https://doi.org/10.3390/nu14030622>

Santilli, A., Stefanopoulos, S., & Cresci, G. A. M. (2022). The gut barrier and chronic diseases. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 25(3), 178–185.
<https://doi.org/10.1097/mco.0000000000000820>

Santos de Sousa Fernandes, M., Da Costa, J. M., Georgian Badicu, Badicu, G., Santos, G., Silva, D., Lagranha, C., Yagin, F. H., Silva, R., González Fernández, F. T., Tedla, J., & Souza, R. (2024). Polyunsaturated Fatty Acid Supplementation in Athletes: A Systematic Review. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents*, 38(6).
<https://doi.org/10.23812/j.biol.regul.homeost.agents.20243806.367>

Santos-Marcos, J. A., Mora-Ortiz, M., Tena-Sempere, M., Lopez-Miranda, J., & Camargo, A. (2023). Interaction between gut microbiota and sex hormones and their relation to sexual dimorphism in metabolic diseases. *Biology of Sex Differences*, 14(1), 4.
<https://doi.org/10.1186/s13293-023-00490-2>

Scheiman, J., Luber, J. M., Chavkin, T. A., MacDonald, T., Tung, A., Pham, L.-D., Wibowo, M. C., Wurth, R. C., Punthambaker, S., Tierney, B. T., Yang, Z., Hattab, M. W., Avila-Pacheco, J., Clish, C. B., Lessard, S., Church, G. M., & Kostic, A. D. (2019). Meta-omics analysis of elite athletes identifies a performance-enhancing microbe that functions via lactate metabolism. *Nature Medicine*, 25(7), 1104–1109. <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0485-4>

Schreiber, C., Tamir, S., Golan, R., Weinstein, A., & Weinstein, Y. (2021). The effect of probiotic supplementation on performance, inflammatory markers and gastro-intestinal symptoms in elite road cyclists. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 18(1), 36.
<https://doi.org/10.1186/s12970-021-00432-6>

Schreiber, F., Balas, I., Robinson, M. J., & Bakdash, G. (2024). Border Control: The Role of the Microbiome in Regulating Epithelial Barrier Function. *Cells*, 13(6), 477. <https://doi.org/10.3390/cells13060477>

Schwellnus, M., Adami, P. E., Bougault, V., Budgett, R., Clemm, H. H., Derman, W., Erdener, U., Fitch, K., Hull, J. H., McIntosh, C., Meyer, T., Pedersen, L., Pyne, D. B., Reier-Nilsen, T., Schobersberger, W., Schumacher, Y. O., Sewry, N., Soligard, T., Valtonen, M., ... Engebretsen, L. (2022). International Olympic Committee (IOC) consensus statement on acute respiratory illness in athletes part 1: Acute respiratory infections. *British Journal of Sports Medicine*, 56(19), 1066–1088. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-105759>

Shi, X., Hu, L., Nieman, D. C., Li, F., Chen, P., Shi, H., & Shi, Y. (2025). Exercise workload: A key determinant of immune health – a narrative review. *Frontiers in Immunology*, 16, 1617261. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1617261>

Slavin, J. (2013). Fiber and Prebiotics: Mechanisms and Health Benefits. *Nutrients*, 5(4), 1417–1435. <https://doi.org/10.3390/nu5041417>

Soderholm, A. T., & Pedicord, V. A. (2019). Intestinal epithelial cells: At the interface of the microbiota and mucosal immunity. *Immunology*, 158(4), 267–280. <https://doi.org/10.1111/imm.13117>

Song, C., Chai, Z., Chen, S., Zhang, H., Zhang, X., & Zhou, Y. (2023). Intestinal mucus components and secretion mechanisms: What we do and do not know. *Experimental & Molecular Medicine*, 55(4), 681–691. <https://doi.org/10.1038/s12276-023-00960-y>

Su, Y., & Su, Z. (2025). Impact of exercise on immune cell infiltration in muscle tissue: Implications for muscle repair and chronic disease. *Clinical and Experimental Medicine*, 25(1), 306. <https://doi.org/10.1007/s10238-025-01852-3>

Sumi, D., & Suzuki, Y. (2025). Gastrointestinal function and microbiota in endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 16, 1551284. <https://doi.org/10.3389/fphys.2025.1551284>

Sutherland, D. B., & Fagarasan, S. (2012). IgA synthesis: A form of functional immune adaptation extending beyond gut. *Current Opinion in Immunology*, 24(3), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.co.2012.03.005>

Tajik, N., Frech, M., Schulz, O., Schälter, F., Lucas, S., Azizov, V., Dürholz, K., Steffen, F., Omata, Y., Rings, A., Bertog, M., Rizzo, A., Iljazovic, A., Basic, M., Kleyer, A., Culemann, S., Krönke, G., Luo, Y., Überla, K., ... Zaiss, M. M. (2020). Targeting zonulin and intestinal epithelial barrier function to prevent onset of arthritis. *Nature Communications*, 11(1), 1995. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15831-7>

Teglas, T., & Radak, Z. (2025). Probiotic supplementation for optimizing athletic performance: Current evidence and future perspectives for microbiome-based strategies. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1572687. <https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1572687>

Theis, B. F., Park, J. S., Kim, J. S. A., Zeydabadinejad, S., Vijay-Kumar, M., Yeoh, B. S., & Saha, P. (2025). Gut Feelings: How Microbes, Diet, and Host Immunity Shape Disease. *Biomedicines*, 13(6), 1357. <https://doi.org/10.3390/biomedicines13061357>

Tomova, A., Bukovsky, I., Rembert, E., Yonas, W., Alwarith, J., Barnard, N. D., & Kahleova, H. (2019). The Effects of Vegetarian and Vegan Diets on Gut Microbiota. *Frontiers in Nutrition*, 6, 47. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00047>

Van Hul, M., Cani, P. D., Petitfils, C., De Vos, W. M., Tilg, H., & El-Omar, E. M. (2024). What defines a healthy gut microbiome? *Gut*, 73(11), 1893–1908. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2024-333378>

VanHaitsema, T. A., Gonzalez, S. P., Kajitani, S., Gabriano, E., Hoiosen, G. E., Oldach, M. C., & Kingsley, K. L. (2023). Three weeks of mental training changes physiological outcomes during a time trial to exhaustion. *European Journal of Applied Physiology*, 123(9), 1977–1989. <https://doi.org/10.1007/s00421-023-05206-3>

Virmond Taques Andreoli, R., Zampiér Ulbrich, A., & Labronici Bertin, R. (2025). Probiotic supplementation in reducing exercise-induced gastrointestinal symptoms in endurance athletes: An integrative review. *O Mundo da Saúde*, 49. <https://doi.org/10.15343/0104-7809.202549e16902024I>

Vitti, A., Nikolaidis, P. T., Villiger, E., Onywera, V., & Knechtle, B. (2020). The “New York City Marathon”: Participation and performance trends of 1.2M runners during half-century.

Research in Sports Medicine, 28(1), 121–137.
<https://doi.org/10.1080/15438627.2019.1586705>

Waśkiewicz, Z., Mukhambet, Z., Azerbayev, D., & Bondarev, S. (2025). Inflammatory Response to Ultramarathon Running: A Review of IL-6, CRP, and TNF- α . *International Journal of Molecular Sciences*, 26(13), 6317. <https://doi.org/10.3390/ijms26136317>

Yang, Y., Feng, Z., Luo, Y., Chen, J., Zhang, Y., Liao, Y., Jiang, H., Long, Y., & Wei, B. (2024). Exercise-Induced Central Fatigue: Biomarkers, and Non-Medicinal Interventions. *Aging and Disease*, 0. <https://doi.org/10.14336/AD.2024.0567>

Yao, Y., Shang, W., Bao, L., Peng, Z., & Wu, C. (2024). Epithelial-immune cell crosstalk for intestinal barrier homeostasis. *European Journal of Immunology*, 54(6), 2350631.
<https://doi.org/10.1002/eji.202350631>

Yu, L. C.-H., Wang, J.-T., Wei, S.-C., & Ni, Y.-H. (2012). Host-microbial interactions and regulation of intestinal epithelial barrier function: From physiology to pathology. *World Journal of Gastrointestinal Pathophysiology*, 3(1), 27. <https://doi.org/10.4291/wjgp.v3.i1.27>

Zeng, Q., Li, P., Wu, H., Zhuang, Y., Zhang, Y., Asemani, S., Jamilian, P., Jamali, M., & Yu, H. (2025). Probiotics and gastrointestinal disorders: An umbrella meta-analysis of therapeutic efficacy. *European Journal of Medical Research*, 30(1), 515.
<https://doi.org/10.1186/s40001-025-02788-w>

Zhang, D., Jian, Y.-P., Zhang, Y.-N., Li, Y., Gu, L.-T., Sun, H.-H., Liu, M.-D., Zhou, H.-L., Wang, Y.-S., & Xu, Z.-X. (2023). Short-chain fatty acids in diseases. *Cell Communication and Signaling: CCS*, 21(1), 212. <https://doi.org/10.1186/s12964-023-01219-9>

Zheng, Y., Zhang, Z., Tang, P., Wu, Y., Zhang, A., Li, D., Wang, C.-Z., Wan, J.-Y., Yao, H., & Yuan, C.-S. (2023). Probiotics fortify intestinal barrier function: A systematic review and meta-analysis of randomized trials. *Frontiers in Immunology*, 14.
<https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1143548>

9. Anhang

9.1. Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift