



Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Department Ökotrophologie

Bachelorarbeit

**Die Effekte einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung auf
direkte und indirekte Parameter der sportlichen
Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten – eine systematische
Literaturrecherche**

vorgelegt von

Pia Bothe,



SoSe 2024

Hamburg, 12. September 2024

Erstbetreuerin:	Frau Prof. Dr. Anja Carlsohn
Zweitbetreuerin:	Frau Prof. Dr. Petra Naujoks

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	1
Abstract.....	2
1 Einleitung	3
2 Omega-3-Fettsäuren	4
2.1 Definition und Aufbau	4
2.2 Wirkungsweise und Funktion im menschlichen Organismus.....	4
2.3 Vorkommen	6
2.4 Zufuhrempfehlungen.....	6
3 Sportliche Leistungsfähigkeit im Ausdauersport	7
3.1 Definition Ausdauer.....	7
3.2 Definition Ausdauersport.....	7
3.3 Definition Athlet	8
3.4 Messung sportlicher Leistungsfähigkeit	9
3.4.1 Direkte Parameter	9
3.4.2 Indirekte Parameter.....	10
3.5 Formulierung der Forschungsfrage.....	14
4 Methode.....	14
4.1 Suchstrategie und Vorgehen	14
4.2 Einschluss- und Ausschlusskriterien.....	15
4.3 Suchstrategie	15
4.4 PRISMA Flow-Chart	17
5 Ergebnisse	18

5.1	PICOR-Tabelle	18
5.2	Beschreibung der randomisierten kontrollierten Studien	22
5.2.1	Effekte auf direkte Parameter	22
5.2.2	Effekte auf indirekte Parameter	23
6	Diskussion	26
6.1	Diskussion der Ergebnisse	26
6.1.1	Diskussion der Effekte auf direkte Parameter	26
6.1.2	Diskussion der Effekte auf indirekte Parameter	29
6.1.3	Limitationen der ausgewählten Studien	34
6.2	Methodische Kritik	35
7	Schlussfolgerung	36
8	Literaturverzeichnis.....	38
9	Eidesstattliche Erklärung.....	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Chemischer Aufbau der Omega-3-Fettsäuren ALA, EPA und DHA (Hauner et al., 2007)	4
Abbildung 2: Eicosanoidsynthese (Wall et al., 2010).....	6
Abbildung 3: PRISMA Flow-Chart zur Vorgehensweise bei der systematischen Literaturrecherche	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Suchstrategietabelle für die PubMed-Recherche.....	16
Tabelle 2: PICOR-Schema.....	19

Abkürzungsverzeichnis

AA	Arachidonsäure
AHA	American Heart Association
ALA	α -Linolensäure
BASE	Bielefeld Academic Search Engine
CAT	Katalase
CPK	Kreatinphosphokinase
CRP	C-reaktives Protein
DHA	Docosahexaensäure
EPA	Eicosapentaensäure
GPx	Glutathionperoxidase
GSH	Gluthation
HDL-C	HDL-Cholesterin
H ₂ O ₂	Wasserstoffperoxid
IL-1 β	Interleukin-1 β
IL-6	Interleukin-6
IL-8	Interleukin-8
KYNA	Kyurensäure
LA	Linolsäure
MCT	Mittelkettige Triglyceride
MDA	Malondialdehyd
NRG4	Neuroregulin-4
PA	Picolinsäure
SOD	Superoxiddismutase
TNF- α	Tumornekrosefaktor
VO _{2max}	Maximale Sauerstoffaufnahme
WHO	World Health Organisation
XA	Xanthureninsäure
3-HK	3-Hydroxykynurenin
3-HAA	3-Hydroxyanthranilsäure

Zusammenfassung

Omega-3-Fettsäuren sind ein essenzieller Nährstoff für den menschlichen Körper und zeigen zahlreiche gesundheitsfördernde Auswirkungen. Ihre potenziellen Effekte auf die sportliche Leistungsfähigkeit wurden bereits in mehreren Meta-Analysen untersucht, allerdings ohne klare Differenzierung zwischen Kraft- und Ausdauersportarten. Ziel dieser systematischen Literaturrecherche war es, die verfügbare Evidenz zu den Auswirkungen einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung auf die direkten und indirekten Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten zu untersuchen und zu dokumentieren.

Dazu wurden die Online-Datenbanken PubMed und BASE herangezogen und sechs für die Beantwortung der Forschungsfrage relevante Studien identifiziert.

Die Ergebnisse zeigten, dass tendenziell größere Effekte einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung auf indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit bestanden, insbesondere auf Entzündungs- und Muskelschädigungsmarker. Im Gegensatz dazu waren die Auswirkungen auf direkte Leistungsparameter weniger konsistent und zeigten in der Mehrzahl der Studien keine signifikanten Unterschiede.

Teilweise erklären die geringen Stichprobengrößen (maximal 24 Teilnehmer), der kurze Interventionszeitraum sowie die unterschiedlichen Supplementierungsmengen und -arten die Heterogenität der Ergebnisse. Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass Omega-3-Fettsäuren vor allem indirekte Leistungsparameter positiv beeinflussen können. Durch die große Heterogenität der Ergebnisse kann jedoch keine abschließende Bewertung der Auswirkungen auf direkte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit abgegeben werden.

Abstract

Omega-3 fatty acids are an essential nutrient for the human body and have various health-promoting effects. Their potential effects on athletic performance have already been investigated in several meta-analyses, but without a clear differentiation between strength and endurance sports. The aim of this systematic literature review was to examine and document the available evidence on the effects of omega-3 fatty acid supplementation on the direct and indirect parameters of athletic performance in endurance athletes.

For this purpose, the online databases PubMed and BASE were used and six studies relevant to answering the research question were identified.

The results showed that there tended to be greater effects of omega-3 fatty acid supplementation on indirect parameters of athletic performance, particularly on markers of inflammation and muscle damage. In contrast, the effects on direct performance parameters were less consistent and showed no significant differences in many studies.

The small sample sizes (maximum 24 participants), the short intervention period and the different amounts and types of supplementation partly explain the heterogeneity of the results. Overall, the results indicate that omega-3 fatty acids can have a positive effect on indirect performance parameters in particular. However, due to the great heterogeneity of the results, no conclusive assessment of the effects on direct parameters of athletic performance can be made.

1 Einleitung

Obwohl Fette in der Sporternährung im Gegensatz zu Kohlenhydraten und Proteinen eine eher untergeordnete Rolle spielen (Schenk et al., 2019), werden insbesondere die Omega-3-Fettsäuren immer häufiger in Bezug auf ihre Auswirkungen im Sport beleuchtet. Omega-3-Fettsäuren besitzen wichtige antientzündliche Eigenschaften und sind obligatorisch für eine normale Gehirnfunktion und -entwicklung (Fernández-Lázaro et al., 2024). Bei Sportlern wird häufig über erhöhten oxidativen Stress und Entzündungsreaktionen in den Muskeln berichtet. Omega-3-Fettsäuren zeigten bereits in der Vergangenheit eine Verringerung der Produktion von entzündlichen Eicosanoiden, Zytokinen und reaktiven Sauerstoffspezies (Mickleberough, 2013). In Bezug auf Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit wurde durch eine Omega-3-Fettsäuresupplementierung in der Vergangenheit ein verlangsamter Rückgang von Muskelmasse und -funktion bei älteren Erwachsenen (Smith et al., 2015) und subjektiv geringer verspürte Schmerzreaktionen in Bezug auf Muskelkater bei untrainierten Frauen beobachtet (Tinsley et al., 2016). Eine Meta-Analyse von Fernández-Lázaro et al. (2024) untersuchte die Wirkung von Omega-3-Fettsäuren auf unterschiedliche Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit und kam zu dem Ergebnis, dass sich eine Omega-3-Fettsäuresupplementierung positiv auf die Entzündungsreaktion nach dem Sport auswirken kann, da ein Rückgang von Interleukin-6 (IL-6) beobachtet wurde. Auch ein Rückgang der Muskelschädigungsmarker Kreatinkinase und Laktatdehydrogenase (LDH) wurde verzeichnet. Allerdings wurden die für die Meta-Analysen herangezogenen randomisierten kontrollierten Studien nicht in bestimmte Sportarten eingegrenzt, sodass sowohl Kraft- als auch Ausdauersportarten evaluiert wurden.

Ziel dieser systematischen Literaturrecherche ist es, die Ergebnisse hinsichtlich einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung im Ausdauersport zu dokumentieren und die Frage zu beantworten, ob und welchen Einfluss Omega-3-Fettsäuren auf ausgewählte direkte und indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit bei Ausdauerathleten haben.

Die Arbeit beginnt zunächst mit dem theoretischen Hintergrund und der Definition relevanter Begriffe. Anschließend wird im Methodenteil die Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche beschrieben und anhand einer Search-Flow-Chart visualisiert. Der Ergebnisteil gliedert sich in die Studienergebnisse bezüglich direkter und indirekter Parameter. Die PICOR-Tabelle enthält die wichtigsten Ergebnisinformationen und ermöglicht einen Überblick über das Studiendesign. Abschließend erfolgt eine kritische Ergebnis- sowie Methodendiskussion, die in der Schlussfolgerung zur Beantwortung der Forschungsfrage führt.

2 Omega-3-Fettsäuren

2.1 Definition und Aufbau

Omega-*n*-Fettsäuren stellen eine Gruppe mehrfach ungesättigter Fettsäuren dar, wobei *n* die Position der ersten Doppelbindung vom Ende der Methylgruppe angibt. Mehrfach ungesättigte Fettsäuren, auch als PUFA (polyunsaturated fatty acids) bezeichnet, weisen mindestens zwei Doppelbindungen auf. Doppelbindungen mit einer Entfernung von mehr als neun C-Atomen vom Carboxylende der Fettsäure können vom Säugetierorganismus nicht eigenständig eingefügt werden. Aus diesem Grund sind Omega-3- und Omega-6-Fettsäuren für den menschlichen Körper essenziell (Leitzmann & Keller, 2020). Die Konversionsrate von α -Linolensäure (ALA) zu Eicosapentaensäure (EPA) liegt bei gesunden Erwachsenen etwa zwischen 8-12 %, während die zu Docosahexaensäure (DHA) unter 1% beträgt. Die Umwandlungsraten für Frauen sind deutlich höher (ALA zu EPA bis zu 21 %; ALA zu DHA bis zu 9 %) als für Männer (ALA zu EPA 0,3-8 %; ALA zu DHA < 1 %), da die Bedarfsdeckung des Fötus und Säuglings während der Schwangerschaft und Stillzeit gewährleistet werden muss (Leitzmann & Keller, 2020, S.331). ALA wird als essenziell für den menschlichen Körper bezeichnet, während EPA und DHA als semi-essenziell gelten, da ihre Synthese von ALA abhängig ist (Englert & Siebert, 2016, S. 36).

Die folgende Abb. 1 veranschaulicht den Aufbau der drei zuvor beschriebenen Omega-3-Fettsäuren.

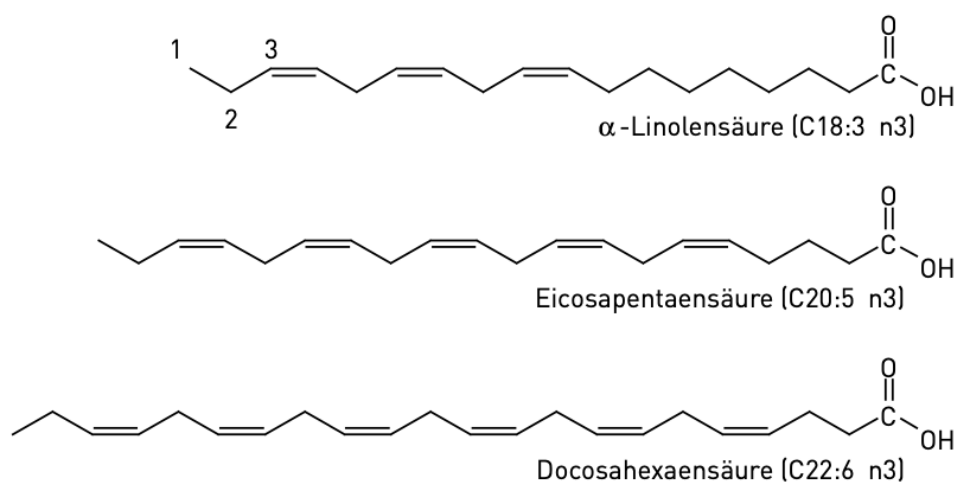


Abbildung 1: Chemischer Aufbau der Omega-3-Fettsäuren ALA, EPA und DHA (Hauner et al., 2007)

2.2 Wirkungsweise und Funktion im menschlichen Organismus

Die drei Omega-3-Fettsäuren ALA, DHA und EPA haben als Bestandteile der Netzhaut und der Membranlipide einen positiven Einfluss auf die Gehirnentwicklung, die Zellintegrität, die Funktion der Nervenzellen und den Sehvorgang (Elmadfa & Leitzmann, 2003, S. 159). Gehirn und

Nervenzellen enthalten hohe Konzentrationen an Omega-3-Fettsäuren, allen voran DHA, die zusammen mit der Omega-6-Fettsäure Arachidonsäure (AA) als Bestandteil der Netzhaut besonders wichtig für die Gehirnentwicklung des Fötus und Säuglings sowie für die Entwicklung des Auges ist (Leitzmann & Keller, 2013, S. 245). Außerdem haben Omega-3-Fettsäuren unzählige gesundheitliche Vorteile bezüglich Diabetes, Krebs, Depressionen und verschiedenen psychischen Erkrankungen sowie altersbedingtem kognitivem Abbau, Parodontose und rheumatoider Arthritis (Shahidi & Ambigaipalan, 2018). Weitere Wirkungen sind unter anderem die Verbesserung der Fließeigenschaften des Blutes, blutdrucksenkende Effekte, Senkung der Triglycerid- und LDL-Werte, Erhöhung der HDL-Werte und die damit verbundene Vorbeugung von Arteriosklerose und damit von Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Auch bei chronisch entzündlichen Erkrankungen sollen Omega-3-Fettsäuren günstig wirken (Elmadfa, 2019, S. 102). Darüber hinaus fungieren die Omega-6-Fettsäuren Linolsäure (LA) und ALA als Ausgangsstoffe für Eicosanoide. Diese hormonähnlichen Substanzen wirken antagonistisch und sind an Entzündungsprozessen im Körper beteiligt. Während der Eicosanidsynthese wird ALA unter anderem in DHA und EPA umgewandelt, um schließlich Eicosanoide zu bilden. Die aus EPA gebildeten Prostaglandine, Thromboxane und Prostazykline der 3er-Reihe und Leukotriene der 5er-Reihe wirken entzündungshemmend. Die durch Omega-3-Fettsäuren gebildeten Eicosanoide zeigen gefäßerweiternde und antithrombotische Wirkungen, da sie die Thrombozytenaggregation hemmen (Leitzmann & Keller, 2020, S. 331). Abb. 2 zeigt den Ablauf der Eicosanidsynthese. Niedrige Plasmakonzentrationen von EPA und DHA erhöhen das Risiko für entzündliche und kardiovaskuläre Erkrankungen sowie für psychische und neurologische Störungen. Daher sind erhöhte EPA- und DHA-Konzentrationen im Blutplasma positiv zu bewerten. Da jedoch die Umwandlung von ALA in EPA und DHA gering ist und durch eine hohe Zufuhr von LA und Transfettsäuren wieder reduziert wird, weil die Fettsäuren um die dafür vorgesehenen Enzymsysteme konkurrieren (siehe Abb. 2), wird ein Omega-6- zu Omega-3-Fettsäureverhältnis von 5:1 empfohlen. Eine geringere Aufnahme von LA korreliert mit einer erhöhten endogenen Synthese von EPA, während die Bildung von DPA durch eine erhöhte Aufnahme von ALA gefördert wird (Englert & Siebert, 2016).

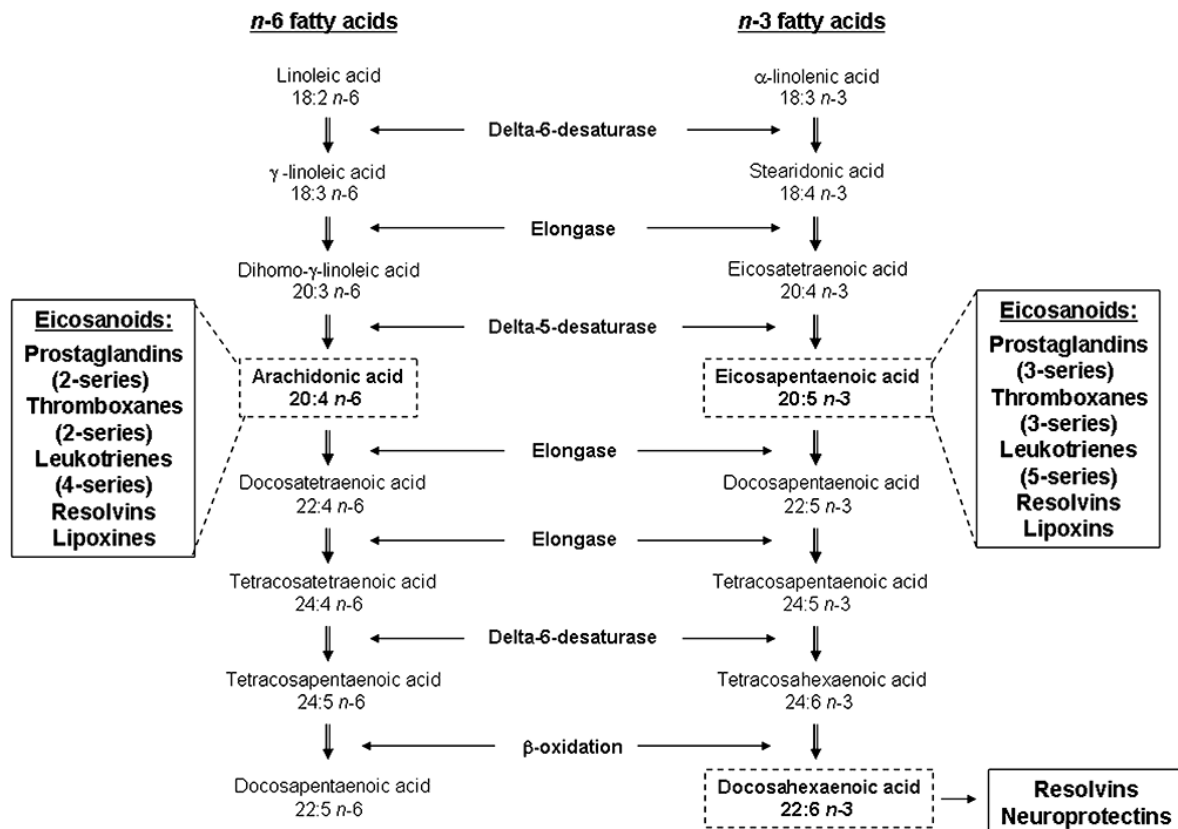


Abbildung 2: Eicosanoidsynthese (Wall et al., 2010)

2.3 Vorkommen

Da ALA und LA von tierischen Organismen nicht synthetisiert werden können, kommen sie ausschließlich in pflanzlichen Organismen vor. Lebensmittel mit einem hohen Gehalt an ALA sind beispielsweise Leinöl (54 g/100 g) und Walnüsse (8 g/100 g) (Leitzmann & Keller, 2020, S. 333).

Als pflanzliche Quelle für EPA und DHA gelten bestimmte Mikroalgen, die wiederum von aquatischen Organismen aufgenommen und angereichert werden, da die Synthese der langkettigen Omega-3-Fettsäuren nicht in den Fischen selbst erfolgt. Insbesondere Kaltwasserfische wie Makrele, Hering und Lachs enthalten hohe Mengen an EPA und DHA. Auch Muttermilch enthält EPA und DHA, was darauf schließen lässt, dass die beiden langkettigen Omega-3-Fettsäuren für den Säugling essenziell sind. In den Industrieländern werden zunehmend Nahrungsergänzungsmittel in Form von Mikroalgenöl angeboten (Leitzmann & Keller, 2013).

2.4 Zufuhrempfehlungen

Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung empfiehlt, in jedem Lebensalter und in jeder Lebenssituation 0,5 % (Schätzwert) der Energie aus ALA aufzunehmen, was bei 2.200 Kilokalorien 1,2 g entspricht. Dagegen haben die American Heart Association (AHA) und die Weltgesundheitsorganisation (WHO) ihre Empfehlungen konkretisiert: Die AHA empfiehlt eine tägliche Zufuhr von 1,5 bis

3 g ALA sowie 500 mg EPA und DHA pro Tag. Die WHO setzt die Menge an ALA auf 2 g und die Aufnahme von EPA und DHA auf 200 mg pro Tag an (Hauner et al., 2007).

Fette sind Kohlenhydraten und Proteinen in der Sporternährung eher untergeordnet, weshalb die DGE für Sportler die gleichen Zufuhrempfehlungen wie für die Allgemeinbevölkerung ausspricht. Demnach sollte die maximale Energiezufuhr aus Fett zwischen 20 und 30 % liegen, wovon wiederum mindestens 7 % aus mehrfach ungesättigten Fettsäuren, also Omega-6- und Omega-3-Fettsäuren, stammen sollten (Schek et al., 2019).

3 Sportliche Leistungsfähigkeit im Ausdauersport

Um die für die Forschungsfrage relevanten Ergebnisse herausfiltern zu können, werden zunächst die Begriffe *Ausdauer*, *Ausdauersport* und *Athlet* definiert.

3.1 Definition Ausdauer

Der Begriff *Ausdauer* beschreibt allgemein die psycho-physische Ermüdungswiderstandsfähigkeit. Ausdauer kann durch verschiedene Parameter definiert werden, so wird in Abhängigkeit von der beteiligten Muskulatur zwischen allgemeiner und lokaler Ausdauer sowie in Abhängigkeit von der Sportart zwischen allgemeiner Ausdauer und Grundlagenausdauer unterschieden. Eine weitere Einteilung erfolgt in anaerobe und aerobe Ausdauer, die sich in der Energiebereitstellung und den Stoffwechselvorgängen unterscheiden. Nach der Dauer wird die Ausdauer in Kurz-, Mittel- und Langzeitausdauer differenziert, nach den motorischen Hauptbeanspruchungsformen in Kraftausdauer, Schnellkraftausdauer und Schnelligkeitsausdauer. Darüber hinaus bestimmt die muskuläre Arbeitsweise, ob es sich um eine dynamische oder statische Ausdauer handelt. Die Ausdauerleistungsfähigkeit ist ein entscheidender Faktor sowohl für die Leistungsfähigkeit im Wettkampf als auch für die Belastbarkeit im Training. Eine gut ausgebildete Grundlagenausdauer ermöglicht vor allem über längere Distanzen eine hohe Geschwindigkeit bei gleichzeitig nahezu vollständiger metabolischer Ausgewogenheit (Lamprecht et al., 2017, S. 317).

3.2 Definition Ausdauersport

Die beim Ausdauersport entstehenden Dauerbelastungen sind laut Güllich und Krüger (2022) ab einer Dauer von 70 Sekunden abhängig vom aeroben Stoffwechsel, wobei hier ebenfalls nach unterschiedlichen Disziplinen differenziert wird. Während bei einem 800-Meter-Lauf ebenfalls anaerobe Stoffwechselwege durch den Körper genutzt werden, sind es bei einem Marathonlauf die aeroben Stoffwechselwege. Eine Unterteilung erfolgt in die Glukose- und Fettoxidation. Die Gesamtenergiemenge, welche bei aeroben Stoffwechselwegen bereitgestellt werden kann, ist signifikant größer als die der anaeroben und beträgt, in Abhängigkeit von der Dauer, über 90 % der Energieproduktion.

Güllich und Krüger definieren drei Faktoren, welche die Höhe der Leistung im Ausdauersport determinieren:

1. Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_{2max})
2. Die prozentuale Erhaltung der maximalen Sauerstoffaufnahme über einen längeren Zeitraum
3. Die Bewegungsökonomie, d. h. der Energiebedarf für die Erbringung einer Leistung

Als Indikator für die Ausdauerleistungsfähigkeit findet im Ausdauersport in der Regel die VO_{2max} Anwendung. Sie bezeichnet die maximale Menge an Sauerstoff, welche der menschliche Organismus aufnehmen und verstoffwechseln kann. Allerdings erlaubt der Wert keine Aussagen darüber, wie lange die VO_{2max} aufrechterhalten werden kann, sodass er lediglich als grober Indikator dient (Güllich & Krüger, 2022, S. 61).

Ein Ausdauertraining von drei bis vier Stunden pro Woche führt zu strukturellen Anpassungen, wie zum Beispiel der Herzmuskelvergrößerung. Außerdem folgen nach mehrmonatigem aeroben Ausdauertraining verschiedene Anpassungsmechanismen, unter anderem die Vergrößerung und Vermehrung von Mitochondrien, Bildung von Slow-Twitch-Fasern, oder auch Typ I-Muskelfasern, die besonders für die aerobe Energiegewinnung geeignet sind sowie eine höhere Durchblutung der Muskeln (Raschka & Ruf, 2022, S. 41-42).

In der vorliegenden Arbeit werden ebenfalls Studien einbezogen, bei denen die Probanden ein Kraftausdauertraining absolvieren, da in einem RCT von Sedano et al. (2013) beobachtet wurde, dass Kraftausdauertraining mit Belastungen von 40 % in Verbindung mit Ausdauertraining neben klassischem Krafttraining unter anderem zu einer verbesserten Laufökonomie und Spitzengeschwindigkeit führt.

3.3 Definition Athlet

Das ursprüngliche Ziel der Arbeit war es, Auswirkungen der Omega-3-Fettsäuren auf direkte und indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten zu untersuchen. Um eine eindeutige Definition für die Forschung in den Bereichen Medizin und Gesundheit zu gewährleisten, wird von Araújo und Scharhag vorgeschlagen, dass vier Kriterien gleichzeitig erfüllt werden müssen, um als Athlet zu gelten:

1. Training im Hinblick auf die Steigerung der eigenen Leistung bzw. Ergebnisse im Rahmen einer sportlichen Betätigung;
2. aktive Teilnahme an Sportwettkämpfen;

3. offizielle Registrierung als Teilnehmer in einer lokalen, regionalen oder nationalen Sportorganisation;
4. Durchführung von sportlichem Training. Die Ausübung von Wettkampfsport stellt für die betreffende Person die Hauptaktivität oder das Hauptinteresse dar. Dabei wird ein Großteil der täglichen Zeit für diese sportlichen Aktivitäten aufgewandt, was zeitliche Ressourcen für andere berufliche oder freizeitbezogene Tätigkeiten einschränkt (Araújo & Scharhag, 2016).

Aufgrund der geringen Datenlage bzw. dem Ergebnismangel beim Addieren des Suchbegriffs *athlete* in Verbindung mit den unter Kapitel 4.1 genannten Suchbegriffen, hat sich die Autorin jedoch dazu entschieden, ebenfalls Amateurausdauersportler sowie untrainierte gesunde Individuen, die während der Intervention ein Ausdauertraining absolvieren, einzubeziehen.

3.4 Messung sportlicher Leistungsfähigkeit

3.4.1 Direkte Parameter

3.4.1.1 Leistungsparameter

Die VO_{2max} beschreibt die Menge an Sauerstoff, die der Organismus aufnehmen und verstoffwechseln kann. Dieser Wert findet insbesondere bei der Messung der Ausdauerleistungsfähigkeit Anwendung. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Werte lediglich eine eingeschränkte Aussagekraft bezüglich der Leistungsfähigkeit besitzen, da im Bereich des Ausdauersports die Dauer und somit die Abruffähigkeit der VO_{2max} über einen längeren Zeitraum von entscheidender Bedeutung sind. Diesbezüglich sei angemerkt, dass trotz identischer VO_{2max} -Werte wesentliche Unterschiede im Endergebnis möglich sind (Güllich & Krüger, 2022, S.61).

Weitere Leistungsparameter sind die maximalen Wiederholungsraten, die maximale freiwillige isometrische Kontraktion, die Zeit bis zur Erschöpfung, die Gesamtbelastung während des Ausdauer-tests, die Laufzeit und Distanz bis zur Erschöpfung sowie die Gesamtbelastung während des Trainings bei 80 % der VO_{2max} . In einer doppelblinden, randomisierten Kontrollstudie von Ochi et al. (2018) wurden die Auswirkungen einer Supplementierung mit EPA-reichem Fischöl auf die Muskelarbeit sowie die Schwellung der Ellbogenbeuger untersucht. Nach einer achtwöchigen Intervention konnten in der Interventionsgruppe unter anderem eine erhöhte Arbeitsleistung sowie ein signifikant größerer Bewegungsumfang direkt nach dem Training beobachtet werden. Allerdings befanden sich die Teilnehmer nicht im Muskelausdauerbereich, da jeweils fünf Sätze mit sechs maximalen konzentrischen Wiederholungen durchgeführt wurden.

Die Laktatkonzentration wurde über einen langen Zeitraum als maßgeblicher Ermüdungsfaktor betrachtet, da die Produktion von Laktat den Übergang in den anaeroben Stoffwechselweg markiert.

Dennoch spielt es beim Training eine wesentliche Rolle, da es als Biomarker für die Fettverbrennung in den Skelettmuskeln gilt. Des Weiteren belegen aktuelle Forschungsergebnisse, dass Laktat nach intensivem Training als Substrat zur Glukose-Synthese genutzt wird (Lee et al., 2023).

Trotzdem gilt sie weiterhin als Indikator für die Erschöpfung (Raschka & Ruf, 2022, S. 43).

3.4.1.2 Subjektive Empfindungsparameter

In dieser Arbeit werden die subjektiven Empfindungsparameter anhand der empfundenen Anstrengung nach Durchführung des in der Intervention durchgeführten Trainings sowie der Schmerzwerte in Bezug auf Muskelkater untersucht. Eine Trainingsvermeidung kann bei hohen Schmerzwerten die Konsequenz sein (Kyriakidou et al., 2021). Im Rahmen einer achtwöchigen Studie wurde das subjektive Anstrengungsempfinden untersucht, wobei der Fokus auf den Auswirkungen von EPA-reichem Fischöl auf die Leistungsfähigkeit und das Empfinden der Anstrengung bei gesunden Männern lag. Die Forschenden konnten feststellen, dass die Interventionsgruppe eine geringere subjektive Anstrengung empfand (Kawabata et al., 2014).

3.4.1.3 Ergebnisparameter des anaeroben Trainings

Die Dauer bis zur anaeroben Schwelle sowie der anaerobe Schwellenwert in der Gesamtbelastung des Trainings bei 50 % des VO_{2max} werden den Ergebnisparametern des anaeroben Trainings zugeordnet. Die Wettkampfzeit bei Langstrecken wird maßgeblich durch den Prozentsatz der VO_{2max} determiniert, bei dem die dauerhafte Leistungsfähigkeit unter gleichbleibendem Blutlaktatspiegel aufrechterhalten werden kann (Raschka & Ruf, 2022, S. 42).

3.4.2 Indirekte Parameter

3.4.2.1 Entzündungsmarker

Das proinflammatorische Zytokin Tumornekrosefaktor (TNF- α) ist wichtig für eine normale Reaktion auf Infektionen, da es eine Rolle bei der Abwehr von bakteriellen, viralen und parasitären Infektionen spielt. Allerdings kann eine übermäßige Produktion schädlich sein (Lee et al., 2007).

Interleukin-1 β (IL-1 β) ist ein Entzündungsmarker, der in Endothelzellen und ansässigen Leukozyten vorkommt (Vahdat-Lasemi et al., 2021).

Das Zytokin IL-6 wird als Reaktion auf Infektionen und Gewebsschäden von unterschiedlichen Zelltypen produziert und leitet die Synthese von Akut-Phase-Proteinen, wie dem C-reaktiven Protein (CRP), ein. Diesbezüglich sei angemerkt, dass die akute Entzündungsreaktion von IL-6 dadurch unterstützt wird. Ein Anstieg der IL-6-Spiegel kann zu chronischen Entzündungen und Gewebsschädigungen sowie zur Förderung des Tumorwachstums beitragen (Hirano, 2020).

Das Zytokin IL-8 spielt eine wesentliche Rolle bei akuten Entzündungsreaktionen, indem es die Aktivierung von Neutrophilen induziert. Sowohl IL-8 als auch IL-6 reagieren auf körperliche Anstrengung, die mit exzentrischen Muskelkontraktionen einhergeht. (Pedersen et al., 2007).

Das Akut-Phase-Protein CRP wird vorwiegend in der Leber synthetisiert und gilt als Marker für Infektionen und kardiovaskuläre Ereignisse. Es spielt unter anderem bei der Produktion von Zytokinen, insbesondere IL-6 und TNF- α eine Rolle (Sproston & Ashworth, 2018).

3.4.2.2 Muskelschädigungsmarker

Die Kreatinphosphokinase (CPK) ist das Enzym, das die Reaktion von Kreatin und Adenosintriphosphat (ATP) zu Phosphokreatin und Adenosindiphosphat katalysiert. Da diese Reaktion reversibel ist, kann wiederum ATP erzeugt werden. CPK ist unter anderem im Herzgewebe, Skelettmuskeln und im Gehirn vorhanden (McLeish & Kenyon, 2005). Die Messung von Serum-CPK ist unter anderem ein wichtiger Bestandteil der Untersuchung von Patienten mit Muskelschwäche (Moghadam-Kia et al., 2016).

Ein weiterer relevanter Marker für eine Muskelschädigung ist das Enzym LDH, welches die Umwandlung von Laktat zu Pyruvat initiiert. Erhöhte LDH-Werte im Blut können unter anderem auf Muskeltrauma, Lebererkrankungen, Krebserkrankungen oder Knochenbrüche zurückzuführen sein. In der Sportmedizin zeigt LDH möglicherweise die Reaktion der Muskeln auf das Training an, da nach 3 bis 5 Stunden ein Anstieg in den Skelett- und Herzmuskeln zu verzeichnen ist (Farhana & Lappin, 2023).

3.4.2.3 Oxidative Stressmarker und antioxidative Kapazität

Das Enzym Superoxiddismutase (SOD) spielt eine wichtige Rolle bei der antioxidativen Abwehr von oxidativem Stress im Körper, da es die Umwandlung des freien Superoxidanion-Radikals in Wasserstoffperoxid und molekularen Sauerstoff katalysiert (Rosa et al., 2021). Eine Metaanalyse von Yining Xu et al. (2022) konnte beobachten, dass regelmäßige moderate bis intensive körperliche Betätigung die SOD-Aktivität erhöht.

Malondialdehyd (MDA) ist das wichtigste Produkt der Peroxidation mehrfach ungesättigter Fettsäuren. Seine Wechselwirkung mit DNA und Proteinen wird häufig als potenziell mutagen und atherogen bezeichnet (Del Rio et al., 2005). Es wird als Marker für oxidativen Stress bei unterschiedlichen Krankheiten verwendet. Ein Anstieg der MDA-Spiegel kann zu einer Förderung entzündlicher Prozesse führen (Cordiano et al., 2023).

Das antioxidative Enzym Glutathionperoxidase (GPx) schützt die Zellen vor oxidativem Stress, indem es die Reduktion von Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und organischen Hydroperoxiden zu Wasser beziehungsweise den entsprechenden Alkoholen katalysiert (Pei et al., 2023).

Gluthation (GSH) ist ein wichtiges nicht-enzymatisches Antioxidans, das die Zellen vor Schäden durch reaktive Sauerstoffspezies und freien Radikalen sowie Elektrophile eliminiert (Liu et al., 2021).

Ein weiteres antioxidatives Enzym ist die Katalase (CAT), welche ebenfalls eine wichtige Rolle beim Schutz der Zellen vor oxidativen Schäden durch H_2O_2 hat, da es bei der Umwandlung von H_2O_2 in Sauerstoff und Wasser mitwirkt (Glorieux & Calderon, 2017). In einem RCT konnte nachgewiesen werden, dass der CAT-Spiegel bei Patienten mit wahrscheinlicher Alzheimer-Krankheit durch die Einnahme von DHA- und EPA-reichem Fischöl ansteigt (Torres-Mendoza et al., 2022).

α -Tocopherol, welches als eine der Hauptformen des Vitamins E fungiert, enthält ebenfalls antioxidative Eigenschaften. Eine Metaanalyse von Kim et al. (2022) demonstriert, dass eine niedrige Dosis an Vitamin E bereits in der Lage ist, den durch sportliche Aktivität ausgelösten oxidativen Stress zu reduzieren.

3.4.2.4 Neuroregulation und Tryptophanmechanismus

Tryptophan stellt einen Vorläufer verschiedener Metaboliten dar, zu denen unter anderem 3-Hydroxykynurenin (3-HK), Picolinsäure (PA), Kyurensäure (KYNA), Xanthurensäure (XA) sowie 3-Hydroxyanthranilsäure (3-HAA) zählen (Savitz, 2019). Sie sind an Entzündungs- und Immunreaktionen beteiligt (Cervenka et al., 2017). PA zeigt unter anderem neuroprotektive und immunologische Wirkungen (Grant et al., 2009).

3.4.2.5 Adipozytokine und metabolische Marker

Das Adipozytokin Adiponektin erhöht die Insulinsensitivität, steigert die Glukoseaufnahme und fördert die Fettsäureoxidation im Skelettmuskelgewebe (Chandran et al., 2003).

Leptin ist ein Adipozytenhormon, das dem zentralen Nervensystem sowie peripheren Organen den Ernährungszustand anzeigt. Der Leptinspiegel im Plasma hängt direkt mit dem Body-Mass-Index und dem Körperfettanteil zusammen. Außerdem trägt Leptin zur Regulierung des Körpergewichts bei (Prolo et al., 1998). Weiterhin wird das Adipozytokin Neuroregulin-4 (NRG4) untersucht. Neuroreguline sind Wachstumsfaktoren, die eine wichtige Rolle in der Myogenese spielen und den Muskelstoffwechsel regulieren. Aus einer experimentellen Laborstudie geht hervor, dass Neuroreguline die oxidative Kapazität und die Insulinsensitivität von Muskelzellen entscheidend modulieren (Cantó et al., 2007).

3.4.2.6 Kardiovaskuläre Parameter

Ein erhöhter Blutdruck stellt einen der maßgeblichsten Risikofaktoren für die Entwicklung kardiovaskulärer Erkrankungen dar. Eine Meta-Analyse konnte nachweisen, dass Ausdauertraining,

dynamisches Krafttraining sowie isometrisches Krafttraining zu einer signifikanten Verringerung des systolischen sowie diastolischen Blutdrucks führen (Cornelissen et al., 2013).

3.4.2.7 Mentale Stimmung

Eine Review von 2023 kam zu dem Schluss, dass Athleten aller Alters- und Leistungsklassen ähnlich häufig unter psychischen Symptomen leiden wie die Allgemeinbevölkerung. Darüber hinaus könnte es einen Zusammenhang zwischen psychischen Störungen und dem erhöhten Risiko für Verletzungen geben. Bei verletzten Sportlern wiederum können längere Erholungszeiten, erneut auftretende Verletzungen und geringere Rückkehrzeiten durch psychische Störungen begünstigt werden (Rogers et al., 2023).

In einem RCT wurden Menschen, die nach eigenen Angaben an Depressionen litten, über drei Monate mit einer mediterranen Diät vertraut gemacht und haben zusätzlich über sechs Omega-3-Fettsäurereiches Fischöl supplementiert. Dabei wurde eine Verbesserung der mentalen Gesundheit in der Interventionsgruppe beobachtet (Parletta et al., 2017).

3.4.2.8 Wirkungsweise von Omega-3-Fettsäuren im Sport

Es liegen zunehmend Belege dafür vor, dass die orale Supplementation mit EPA und DHA direkte und indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit verbessern kann. Eine Studie zeigte, dass achtwöchiges supplementieren von EPA- und DHA-reichem Fischöl die Trainingsökonomie und die wahrgenommene Anstrengung bei gesunden, untrainierten Männern verbessert (Kawabata et al., 2014).

In einer narrativen Übersichtsarbeit von Thielecke und Blannin (2020) erfolgt eine Gegenüberstellung der Effekte von Omega-3-Fettsäuren zwischen professionellen Athleten und Amateursportlern. Es lässt sich festhalten, dass EPA und DHA potenziell positiv auf die Ausdauerkapazität, Regeneration und Immunmodulation wirken. Dabei könnten die Vorteile für Amateure sogar ausgeprägter sein, wobei an dieser Stelle erwähnt werden muss, dass der Großteil der untersuchten Studien mit Amateursportlern durchgeführt wurde. Außerdem wurden neben Studien, die Ausdauersportarten untersuchten, auch Teamsportarten wie Rugby und Fußball sowie auch Kraftsportarten untersucht. Eine der sich auf Ausdauersportarten beziehenden Studien aus der Übersichtsarbeit von Thielecke und Blannin (2020) untersuchte die Herzfrequenzerholung bei Radsportlern. In der doppelblinden Parallelstudie von Macartney et al. (2014) konnte gezeigt werden, dass selbst eine niedrige Fischöldosis den Omega-3-Index erhöht und die mittlere Belastungs-Herzfrequenz reduziert. Ebenfalls verbesserte sich die Herzfrequenz-Erholung, ohne dass die maximale Herzfrequenz beeinträchtigt wurde. Eine weitere Review von Gammone et al. (2018) beschreibt, dass Omega-3-Fettsäuren neben der Stoffwechselreaktion und Belastung der Skelettmuskulatur auch die funktionelle Reaktion über eine Trainingsperiode beeinflussen. Darüber hinaus kann ihre potenzielle entzündungshemmende und antioxidative Wirkung aufgrund der erhöhten Produktion von reaktivem Sauerstoff vor allem bei

Menschen, die körperlich aktiv sind, gesundheitliche Vorteile und eine Leistungssteigerung bewirken. Die Review verzeichnete ebenfalls einen Einfluss auf die Stimmung und den emotionalen Zustand.

Ferner wurde bei einem RCT von Tomczyk et al. (2022) festgestellt, dass eine Supplementierung von EPA und DHA über zwölf Wochen den Omega-3-Index im Vergleich zur Placebo-Gruppe signifikant ansteigen ließ und sich die Lauffeffizienz sowie die VO_{2max} -Werte bei Amateurlangstreckenläufern signifikant verbesserten.

3.5 Formulierung der Forschungsfrage

In Kapitel 3.4.2 wurde die Wirkungsweise von Omega-3-Fettsäuren im Sport aus der Perspektive verschiedener Studien und Übersichtsarbeiten beleuchtet. Die genannten Studien untersuchten jedoch unterschiedliche Sportarten und präsentieren die Ergebnisse nicht in einer übersichtlichen Differenzierung nach Ausdauer- und Kraftsport. Stattdessen geben sie zunächst einen allgemeinen Überblick über die Studienlage. In Anbetracht der unterschiedlichen Anforderungen im Ausdauer- und Kraftsport fokussiert sich diese Arbeit ausschließlich auf die Ausdauer. Ziel ist die systematische Untersuchung der direkten und indirekten Effekte von Omega-3-Fettsäuren im Ausdauersport, um schließlich geeignete Supplementierungsmengen für Nahrungsergänzungsmittelvertreiber und Ausdauerathleten aussprechen zu können.

Aus den dargelegten Gründen ergibt sich folgende Forschungsfrage: "Welche Effekte haben Omega-3-Fettsäuren auf direkte und indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten?"

4 Methode

Nachfolgend werden die Methodik und das Vorgehen der systematischen Literaturrecherche dargelegt, um nachvollziehbare und reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten.

4.1 Suchstrategie und Vorgehen

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, den Einfluss einer Omega-3-Fettsäuresupplementation auf direkte und indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten zu untersuchen. Zur Erlangung eines Überblicks über den aktuellen Forschungsstand dieses noch recht neuen Forschungsbereichs wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt.

Die Recherche wurde in den Datenbanken "PubMed" und "Bielefeld Academic Search Engine" (BASE) durchgeführt. Die Schlagwörter wurden maßgeblich durch die englische Übersetzung der beiden Kernbegriffe der Arbeit, Omega-3-Fettsäuren und Ausdauer, geprägt. Im Kontext der Omega-3-Fettsäuren wurden darüber hinaus die Synonyme "n3 PUFA" sowie die jeweilige Omega-3-Fettsäure ALA, DHA und EPA berücksichtigt.

Die Verknüpfung der Begriffe erfolgte mittels des Booleschen Operators "AND", um eine Beziehung zwischen den Begriffen herzustellen. Des Weiteren wurde der Boolesche Operator "OR" verwendet, um Suchvorschläge mit alternativen Schlagwörtern zu berücksichtigen und somit die Trefferquote zu erhöhen. Die in Tabelle 2 in Kapitel 4.4 dargestellte Recherche basiert auf den in Tabelle 1 in Kapitel 4.3 aufgeführten ausgewählten Schlagwörtern und Booleschen Operatoren.

4.2 Einschluss- und Ausschlusskriterien

Um die Forschungsfrage möglichst konkret beantworten zu können, wurden Einschluss- und Ausschlusskriterien formuliert, um die Studienanzahl durch eine valide Auswahl einzugrenzen. Dazu wurden ausschließlich systematische Reviews, Metaanalysen sowie RCTs eingeschlossen, um eine möglichst verlässliche Datenlage zu analysieren.

Außerdem wurden nur frei verfügbare Volltexte eingeschlossen, die in deutscher oder englischer Sprache verfügbar sind. Es wurden keine alters- oder geschlechtsspezifischen sowie statusgebundene oder geografische Eingrenzungen vollzogen.

Aufgrund der geringen Datenlage wurden auch Studien eingeschlossen, die neben der Supplementierung von ALA, EPA und/oder DHA auch Vitamin E, Vitamin D, α -Tocopherol sowie Glycerin supplementierten. Dies wurde bei der Evidenzbewertung in der Ergebnisdiskussion berücksichtigt.

4.3 Suchstrategie

Die Literaturrecherche wurde systematisch und schrittweise durchgeführt, um eine umfassende Sammlung relevanter Studien zu erhalten. Angesichts der Vielzahl an initialen Treffern war es notwendig, spezifische Schlagwörter auszuwählen und Ein- und Ausschlusskriterien anzuwenden, um die Suche gezielt einzugrenzen. Diese Schlagwörter wurden nach einer ersten Sichtung relevanter Studien festgelegt und mithilfe von Booleschen Operatoren kombiniert. Um die Ergebnisse weiter zu optimieren, wurden anschließend spezifische Filter angewendet.

Mithilfe des Titels oder Abstracts sowie den vordefinierten Kriterien wurde evaluiert, ob sich die gefundenen Studien für die systematische Literaturrecherche eignen. Schließlich wurden sechs relevante Studien identifiziert, welche auch nach der Volltextanalyse noch den Kriterien dieser Arbeit entsprachen und somit final ausgewählt wurden.

Eine übersichtliche Darstellung der systematischen Vorgehensweise bei der Studienaushwahl wird in Kapitel 4.4 anhand einer PRISMA Flow-Chart dargestellt.

Tabelle 1: Suchstrategietabelle für die PubMed-Recherche

Such-anfrage	Datum	Schlagwörter und ggf. Filter	Trefferan-zahl PubMed	Trefferan-zahl BASE
#1	11.06.2024	(omega 3 fatty acids) OR (n3 pufa)	39.773	102.294.459
#2	11.06.2024	((omega 3 fatty acids) OR (n3 pufa)) AND ((endurance) OR (endurance sports))	84	13
#2.1	11.06.2024	((omega 3 fatty acids) OR (n3 pufa)) AND ((endurance) OR (endurance sports)) Filter (PubMed): Free full text, RTCs, Meta-Analysis, Systematic Review Filter (BASE): Open-Access Dokumente	11	13
#3	15.06.2024	((docosapentaenoic acid) OR (eicosapentaenoic acid) OR (alpha linolenic acid)) AND ((endurance) OR (endurance sports))	38	0
#3.1	15.06.2024	((docosapentaenoic acid) OR (eicosapentaenoic acid) OR (alpha linolenic acid)) AND ((endurance) OR (endurance sports)) Filter: Free full text, RTCs, Meta-Analysis, Systematic Review	7	0

4.4 PRISMA Flow-Chart

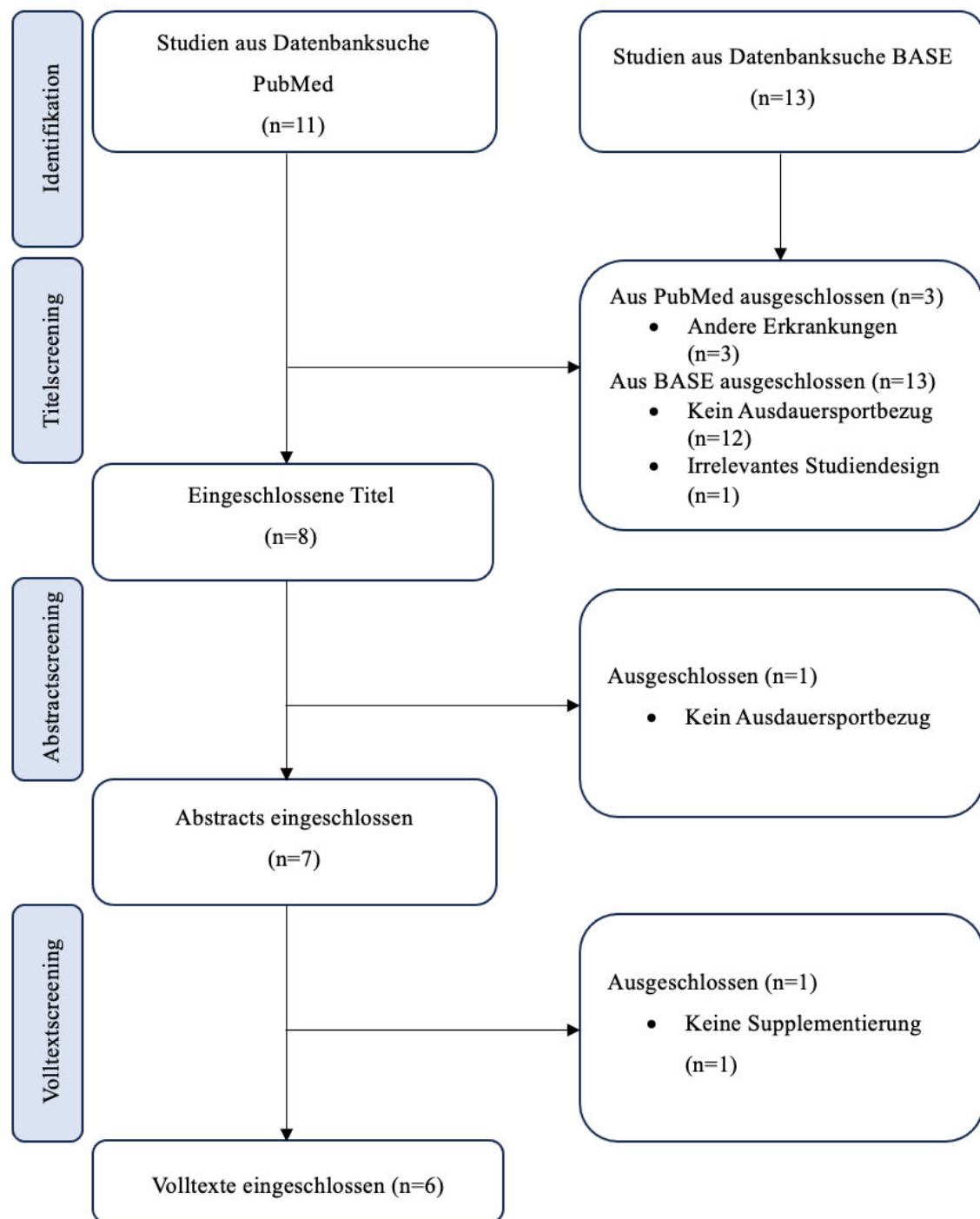


Abbildung 3: PRISMA Flow-Chart zur Vorgehensweise bei der systematischen Literaturrecherche

5 Ergebnisse

5.1 PICOR-Tabelle

Im Folgenden werden anhand des PICOR-Schemas die Inhalte der ausgewählten Studien tabellarisch dargestellt. Das P steht hierbei für Population und enthält alle Informationen zu den Einschlusskriterien der Teilnehmer. I und C stehen für Intervention und Control, wobei die Vorgaben für die Interventionsgruppe bzw. die Kontrollgruppe angegeben werden. Das O steht für Outcome und umfasst die gemessenen Parameter der jeweiligen Studie. In der Spalte Result (R) werden die Ergebnisse der analysierten Parameter zusammengefasst. Die analysierten Parameter beziehen sich ausschließlich auf die zu Studienbeginn und Studienende erhobenen Werte. Anschließend werden die Inhalte der PICOR-Tabelle in einem Fließtext ausführlich beschrieben.

Legende:

- ↓ Signifikant niedriger im Vergleich zum Ausgangswert bzw. Kontrollgruppe ($p < 0,05$)
- ↑ Signifikant höher im Vergleich zum Ausgangswert bzw. Kontrollgruppe ($p < 0,05$)
- ↔ Kein signifikanter Unterschied zum Ausgangswert bzw. Kontrollgruppe ($p > 0,05$)
- PK Positive Korrelation
- NK Negative Korrelation

Tabelle 2: PICOR-Schema

Studie	Morishima et al. (2020)	Żebrowska et al. (2021)	Ramos-Campo et al. (2020)	Tsuji et al. (2023)	Tomczyk et al. (2024)	Nieman et al. (2009)
Population	(n = 19) Gesunde Männer, die mindestens ein Jahr kein Krafttraining durchgeführt hatten Altersdurchschnitt: 20.8 ± 1,5 Jahre	(n = 24) Freizeitmarathonläufer Altersdurchschnitt: 33.3 ± 6,8 Jahre Interventionsgruppe: 33.3 ± 6,8 Jahre Kontrollgruppe: 35 ± 5,8 Jahre	(n = 15) Männliche Amateurausdauerathleten Altersdurchschnitt: 36 ± 8,1 Jahre	(n = 19) Männliche Nichtsportler Altersdurchschnitt: 20 ± 1 Jahre	(n = 26 (von 40 haben 26 die Studie erfolgreich beendet) Männliche Amateurläufer Altersdurchschnitt: 37 ± 3 Jahre Interventionsgruppe: 37 ± 3 Jahre Kontrollgruppe: 37 ± 4 Jahre	(n = 24, 16 Männer, 8 Frauen) Erfahrene Läufer 24-55 Jahre
Intervention (Ausdauer-sport)	Kraftausdauer: Repetitive Kniestreckung mit Gewicht von 40% des Körpergewichts.	Sportliche Aktivitäten wurden weder kontrolliert noch dokumentiert.	Kraftausdauer: Zwei Sätze von je 30 Wiederholungen von Kniebeugung und -streckung im rechten Bein bei einer Winkelgeschwindigkeit von 60°/s. Drei Minuten Pause zwischen den Sätzen.	Stufenweiser Belastungstest auf einem Fahrradergometer.	Dreimal wöchentlich Lauftraining und einmal wöchentlich funktionales Training mit unterschiedlichen Intensitäten.	Laufen bis zur Erschöpfung (70% VO _{2max}).
Intervention (Omega-3-Fettsäuren) mit wiederholter Exposition 1 x täglich	(n = 10) Fischöl-Softgelkapsel mit 600 mg EPA und 260 mg DHA	(n = 12) 6 Fischöl-Softgelkapseln mit insgesamt 852 mg EPA, 1602 mg DHA, 72 mg Vitamin E 30 µg Vitamin D	6 Softgelkapseln mit insgesamt 2100 mg DHA, 240 mg EPA, 2,7 mg α-Tocopherol, 323,4 mg Glycerin	(n = 9) 10 Softgelkapseln mit insgesamt 600 mg verestertes strukturiertes EPA und 260 mg DHA 3,52 g veresterte mittelkettige Triglyceride (MCT)	(n = 14) 2234 mg EPA 930 mg DHA	1) Zweimalige Einnahme von 0,5 L aromatisiertem Wasser mit 7 kcal kg ⁻¹ Chiasamenöl (0,43 g ALA pro Kilogramm KG) (31 g ALA im Durchschnitt) 2) Zweite Gruppe Probandinnen (n = 16, 20-45 Jahre) aßen dreimal einen Snack

						mit 8 g gemahlenden Chiasamen oder Chiasamenöl (1.3 mg ALA).
Interventions- zeitraum	8 Wochen	3 Wochen	10 Wochen mit vierwöchiger Auswaschphase und weiteren 10 Wochen	8 Wochen und 2 Tage	12 Wochen	4 Wochen mit zweiwöchiger Auswaschphase
Control 1 x täglich	(n = 9) Placebo	(n = 12) Placebo	Placebo	(n = 10) 600 mg EPA 260 mg DPA 3,52 g MCT	(n = 12) 4000 mg MCT Weitere Kontrollgruppe (n = 11) mit inaktivem Lebensstil Altersdurchschnitt: 38 ± 6 Jahre	0,5 L aromatisiertes Wasser
Outcome	maximale Wiederholungsraten in den einzelnen Sets ↔ empfundene Anstrengung ↔ maximale freiwillige isometrische Kontraktion ↔ Sauerstoffsättigung ↔ Laktatkonzentration im Blut ↔ Systolischer Blutdruck ↔ Diastolischer Blutdruck ↔	Omega-3-Index ↑ AA/EPA-Verhältnis ↓ AA-Gehalt ↓ TNF-α-Spiegel ↓ Serum-Adiponektinkonzentration ↑ Serumleptinspiegel ↓ Serum-α-Tocopherolspiegel ↑ MDA↑ (Malondialdehyd) NRG4 ↑ GPx ↑ GSH ↑ CAT ↔ SOD-Aktivität ↑ (signifikant niedriger nach der Intervention) ↓ HDL-C-Level ↑	IL-1β ↓ IL-6 ↓ IL-8 ↔ TNF-α ↔ CRP ↔ CPK ↓ LDH-5 ↓ LDH-1, -2, -3, -4 ↔ isokinetische Ergebnisse ↔ empfundene Anstrengung ↔ Schmerzwerte in Bezug auf Muskelkater ↓	VO _{2max} ↔ Zeit bis zur Erschöpfung ↑ Gesamtbelastung während des Ausdauertests ↔ Gesamtbelastung während des Trainings bei 80% des VO _{2max} ↔ Anaerober Schwellenwert in der Gesamtbelastung des Trainings bei 50% des VO _{2max} ↑ Dauer bis zur anaeroben Schwelle ↑	EPA und DHA (% in roten Blutzellen) ↑ EPA und DHA (% in Plasma) ↑ IL-6 ↔ 3-HK ↑ PA ↑ KYNA ↔ XA ↔ 3-HAA ↔ PK EPA-3-HK PK EPA-PA PK EPA-3-HAA PK XA-EPA PK XA-DHA PK XA-Plasma-EPA Mentale Stimmung ↔	VO _{2max} ↔ Laufzeit und Distanz bis zur Erschöpfung ↔ IL-6, IL-8, IL-10 ↔ TNFα ↔ EPA und DHA vor und nach dem Training ↔ Plasma-ALA ↑ Herzrate bei Chiasamenölgruppe ↑

		NK Omega-3-Index-AA/EPA-Verhältnis PK Omega-3-Index-GPx-Aktivität + CAT-Aktivität NK AA/EPA-Verhältnis-SOD-Aktivität NK TNF- α -CAT-Aktivität				
Result (der für diese Arbeit relevanten Gruppen)	Keine signifikante Veränderung auf die untersuchten direkten (maximale Wiederholungsrate in den einzelnen Sets, empfundene Anstrengung, maximale freiwillige isometrische Kontraktion im Blut, Sauerstoffsättigung) und indirekten (systolischer Blutdruck, diastolischer Blutdruck) Parameter.	In der Interventionsgruppe wurde bezüglich der indirekten Parameter ein signifikant erhöhter Omega-3-Index und niedrigeres AA/EPA-Verhältnis, niedrigere TNF- α -Spiegel, eine erhöhte GPx-, GSH-, SOD-Aktivität, Serum- α -Tocopherolspiegel, NRG4- und Adiponektinspiegel, sowie eine positive Korrelation zwischen Omega-3-Index und antioxidativen Enzymen verzeichnet.	Signifikante Veränderungen einiger Entzündungsmarker (IL-1 β , IL-6, TNF- α) und Muskelschädigungsmarker (CPK, LDH-5) in der Interventionsgruppe. Andererseits waren andere Entzündungsmarker (IL-8, CRP) und Muskelschädigungsmarker (LDH-1, -2, -3, -4) nicht signifikant verändert. Bei den direkten Parametern war in der Interventionsgruppe nur ein signifikante Verringerung in Bezug auf die Schmerzwerte des Muskelkaters zu beobachten.	Signifikante Veränderung der direkten Parameter Zeit bis zur Erschöpfung im VO _{2max} -Test, dem anaeroben Schwellenwert in der Gesamtbelastung des Trainings bei 50% des VO _{2max} sowie der Dauer bis zur anaeroben Schwelle in der Interventionsgruppe. Keine signifikante Veränderung bei 80 % des VO _{2max} , der Gesamtbelastung und VO _{2max} .	Signifikante Erhöhung einiger indirekter Parameter (EPA, DHA, 3-HK, PA), jedoch nicht aller (IL-6, KYNA, XA, 3-HAA, mentale Stimmung). Positive Korrelationen zwischen EPA bzw. DHA und Metaboliten der Neuroregulation.	Signifikante Erhöhung des Plasma-ALA und der Herzrate in der Interventionsgruppe, jedoch keine signifikante Veränderung weiterer direkter (VO _{2max} , Laufzeit und Distanz bis zur Erschöpfung) und indirekter Parameter (IL-6, IL-8, IL-10, TNF- α , EPA und DHA vor und nach dem Training) der sportlichen Leistungsfähigkeit.

5.2 Beschreibung der randomisierten kontrollierten Studien

5.2.1 Effekte auf direkte Parameter

Im Rahmen der Studie von Morishima et al. (2020) wurde die Wirkung einer täglichen Dosis von 600 mg EPA und 260 mg DHA aus Fischöl auf verschiedene direkte Parameter bei 19 gesunden männlichen Nicht-Sportlern (Alter: $20,8 \pm 1,5$ Jahre) untersucht. Dabei stand die Frage im Mittelpunkt, ob die muskuläre Ermüdung durch die zahlreichen Muskelkontraktionen durch die Einnahme der Omega-3-Fettsäuren reduziert werden würde. Zu diesem Zweck wurde eine repetitive Kniestreckung mit einem Gewicht von 40 % des Körpergewichts durchgeführt. Der Interventionszeitraum erstreckte sich über einen Zeitraum von acht Wochen. Die Untersuchung umfasste eine Reihe von direkten Parametern, darunter die maximale Wiederholungsrate in den einzelnen Sets, die empfundene Anstrengung, die Sauerstoffsättigung, die maximale freiwillige isometrische Kontraktion, die Laktatkonzentration im Blut sowie den systolischen und diastolischen Blutdruck. Signifikante Unterschiede konnten bei keinem der Parameter festgestellt werden.

Die Studie von Ramos-Campo et al. (2020) basiert auf einer randomisierten, kontrollierten Crossover-Studie, welche die Effekte von reesterifiziertem DHA und EPA auf Entzündungs- und Muskelschädigungsmarker bei Ausdauerathleten untersucht. Die Studie umfasste 15 männliche Amateur-ausdauerathleten ($36,0 \pm 8,1$ Jahre). Der Interventionszeitraum umfasste insgesamt zwanzig Wochen, wobei eine vierwöchige Auswaschphase nach den ersten zehn Wochen integriert wurde. Im Rahmen der Studie wurde die Intervention mit der Einnahme von Placebo-Softgelkapseln wiederholt. In der ersten Phase erfolgte eine Supplementierung von täglich sechs Softgelkapseln, welche insgesamt 2,1 g DHA, 240 mg EPA, 2,7 mg α -Tocopherol sowie 323,4 mg Glycerin enthielten. Die direkten Parameter umfassten die isokinetischen Ergebnisse, die empfundene Anstrengung sowie den Schmerzwert in Bezug auf Muskelkater. Hinsichtlich der isokinetischen Ergebnisse sowie der empfundenen Anstrengung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Allerdings berichteten die Athleten mit signifikantem Unterschied ($p = 0,049$) von geringeren empfundenen Muskelschmerzen.

Die von Tsuji et al. (2023) durchgeführte Studie hatte zum Ziel, die Auswirkungen einer achtwöchigen Supplementierung mit verestertem strukturiertem EPA, DHA und veresterten strukturierten mittelkettigen Triglyceriden auf die Ausdauerleistung von 19 gesunden und untrainierten Männern (20 ± 1 Jahre) zu untersuchen. Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen aufgeteilt. Neun Teilnehmer nahmen täglich zehn Softgelkapseln mit insgesamt 3,52 g mittelkettigen Triglyceriden, 600 mg EPA und 260 mg DHA zu sich, während die übrigen zehn Teilnehmer Softgelkapseln in gleicher Anzahl mit den gleichen Mengeneinnahmen einnahmen, diese waren jedoch nicht verestert. Im Rahmen der

Studie wurden die Effekte einer Supplementierung mit DHA und EPA bei einem stufenweisen Belastungstest auf einem Fahrradergometer untersucht. Die Messungen umfassten den $\text{VO}_{2\text{max}}$, die Gesamtbelastung während des Ausdauertests und während des Trainings mit 80 % $\text{VO}_{2\text{max}}$, den anaeroben Schwellenwert in der Gesamtbelastung des Trainings bei 50 % des $\text{VO}_{2\text{max}}$, die Zeit bis zur Erschöpfung und die Dauer bis zur anaeroben Schwelle. Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen dem $\text{VO}_{2\text{max}}$ und der Gesamtbelastung während des Ausdauertests sowie während des Trainings mit 80 % des $\text{VO}_{2\text{max}}$ festgestellt werden. Jedoch beim anaeroben Schwellenwert in der Gesamtbelastung des Trainings bei 50% des $\text{VO}_{2\text{max}}$ ($p < 0,05$). Auch die anaerobe Schwelle wies in der Interventionsgruppe einen signifikant größeren Wert (82 ± 55 Sekunden) im Vergleich zur Kontrollgruppe (-26 ± 52 Sekunden; $p < 0,001$) auf. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Zeit bis zur Erschöpfung nach der Intervention in der Interventionsgruppe im Vergleich zur Zeit davor signifikant höher war ($53 \text{ Sekunden} \pm 53 \text{ Sekunden}$) als in der Kontrollgruppe ($10 \text{ Sekunden} \pm 63 \text{ Sekunden}$; $p < 0,05$).

In der Studie von Nieman et al. (2009) wurde der Einfluss von ALA-reichem Chiasamenöl auf die Laufleistung untersucht. Die Studie umfasste 24 erfahrene Läufer, darunter 16 Männer und acht Frauen im Alter zwischen 24 und 55 Jahren. Die Teilnehmer nahmen innerhalb eines Zeitraums von vier Wochen zweimal im Abstand von jeweils zwei Wochen eine Menge von 0,5 Litern aromatisierten Wassers zu sich, welches mit 7 kcal kg^{-1} Chiasamenöl angereichert war. Dies entspricht einer Menge von 0,43 g ALA pro Kilogramm Körpergewicht. Im Mittel wurden 31 g ALA konsumiert. Im Anschluss an eine mindestens zweiwöchige Auswaschphase erfolgte die Zufuhr von 0,5 Litern aromatisiertem Wasser durch die gleichen Teilnehmer. 30 Minuten nach der Ingestion wurde mit dem Experiment begonnen. Die Probanden absolvierten auf Laufbändern ein Ausdauertraining bei 70 % ihrer $\text{VO}_{2\text{max}}$. Die Geschwindigkeit wurde konstant gehalten, bis die Probanden erschöpft waren. Es konnten keine signifikanten Veränderungen zwischen den beiden Versuchen hinsichtlich der direkten Parameter $\text{VO}_{2\text{max}}$, Laufzeit und Distanz bis zur Erschöpfung festgestellt werden. Des Weiteren konnte bei der Gruppe, die das Chiasamenöl zu sich genommen hatte, ein signifikanter Anstieg der Herzfrequenz beobachtet werden ($p = 0.015$).

5.2.2 Effekte auf indirekte Parameter

Die Studie von Żebrowska et al. (2021) hatte zum Ziel, die Auswirkungen einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung von 24 Freizeitläufern (Interventionsgruppe: $33,3 \pm 6,8$ Jahre Kontrollgruppe: $35 \pm 5,8$ Jahre) in einem Interventionszeitraum von drei Wochen auf die Veränderungen der Serumadiponektin- und Serumleptinspiegel, NRG4, den Omega-3-Fettsäuregehalt in den Erythrozyten und die antioxidative Abwehrkapazität im Blut durch eine Omega-3-Fettsäuresupplementierung zu untersuchen. Die Probanden wurden randomisiert in zwei gleich große Gruppen aufgeteilt, von denen die Interventionsgruppe täglich sechs Fischöl-Softgelkapseln (vier morgens, zwei abends) mit

insgesamt 852 mg EPA, 1,6 g DHA, 72 mg Vitamin E und 30 µg Vitamin D aufnahm. Die Kontrollgruppe erhielt täglich sechs Placebo-Softgelkapseln. Nach Beenden der Intervention konnte in der Interventionsgruppe ein signifikant erhöhter Omega-3-Index ($p < 0,01$) sowie ein signifikant niedrigeres AA/EPA-Verhältnis ($p < 0,05$) festgestellt werden. Es konnte ein signifikanter Rückgang des AA-Gehalts in der Interventionsgruppe beobachtet werden ($p < 0,05$). Des Weiteren wurden signifikant niedrigere TNF- α -Spiegel sowohl im Vergleich zur Placebo-Gruppe als auch im Vergleich zu den Werten vor der Intervention festgestellt ($p < 0,05$). Außerdem konnte ein signifikanter Anstieg der MDA-Spiegel beobachtet werden ($p < 0,05$). Ebenfalls konnte eine signifikante Erhöhung der GSH- ($p < 0,01$), GPx- ($p < 0,05$) und SOD-Aktivität ($p < 0,01$) beobachtet werden. Letztere wies nach dem Beenden der Supplementierung einen signifikant niedrigeren Wert im Vergleich zur Placebo-Gruppe auf. Der CAT-Spiegel veränderte sich nicht signifikant. Es konnten signifikant erhöhte NRG4-Spiegel ($p < 0,05$) sowie Serumadiponektinspiegel ($p < 0,001$) in der Interventionsgruppe festgestellt werden. Signifikant niedriger waren in der Interventionsgruppe die Serumleptinspiegel ($p > 0,01$). Die Serum- α -Tocopherol-Level wiesen einen signifikanten Anstieg auf ($p < 0,05$). Es konnte eine negative Korrelation zwischen dem postsupplementären Omega-3-Index und dem postsupplementären AA/EPA-Verhältnis beobachtet werden ($r = -0,65$; $p < 0,05$). In der Interventionsgruppe wurde ein potenzieller Zusammenhang zwischen dem Omega-3-Index und dem AA/EPA-Verhältnis sowie den Aktivitäten antioxidativer Enzyme untersucht. Des Weiteren konnte eine signifikant positive Korrelation zwischen dem Omega-3-Index und der GPx-Aktivität ($r = 0,62$; $p < 0,05$) sowie dem Omega-3-Index und der CAT-Aktivität ($r = 0,62$; $p < 0,05$) nachgewiesen werden. Auch konnte eine inverse Korrelation zwischen dem AA/EPA-Verhältnis und der SOD-Aktivität festgestellt werden. In der Interventionsgruppe konnte eine signifikante negative Korrelation zwischen TNF- α und der CAT-Aktivität ($r = -0,72$; $p < 0,01$) beobachtet werden. Es konnte eine positive Korrelation zwischen dem Adiponektinspiegel und der SOD-Aktivität nachgewiesen werden ($r = 0,78$; $p < 0,001$).

In der Studie von Ramos-Campo et al. (2020) wurden neben den direkten Parametern auch indirekte Parameter untersucht. Der IL-1 β -Wert wies zunächst eine signifikante Abnahme direkt nach der Intervention ($p = 0,001$) sowie 24 Stunden ($p = 0,036$) und 48 Stunden später ($p = 0,004$) auf. Des Weiteren konnte ein signifikant geringerer IL-6-Wert im Vergleich zur Placebo-Gruppe beobachtet werden ($p = 0,009$), sowohl direkt nach dem Training ($p = 0,062$) als auch 24 Stunden später ($p = 0,067$). Die Auswertung der Daten ergab, dass keine Effekte beim IL-8-Wert, TNF- α und C-RP zu beobachten waren. Hinsichtlich der Marker für Muskelschäden konnten signifikant niedrigere Werte für CPK ($p = 0,014$) und LDH-5 ($p = 0,05$) beobachtet werden. Im Rahmen der ersten und zweiten Testdurchführung nach der Einnahme von DHA und EPA konnten im Vergleich zur Kontrollgruppe niedrigere Werte von CPK nach 24 Stunden festgestellt werden ($p = 0,001$). Dieser Unterschied war bei der zweiten Testdurchführung signifikant größer als bei der ersten ($p = 0,001$). Im Vergleich zur

Placebo-Gruppe wies die LDH-5-Konzentration direkt nach dem Training ($p = 0,001$), 24 Stunden ($p < 0,001$) sowie 48 Stunden ($p = 0,001$) nach dem zweiten Test ebenfalls signifikant niedrigere Werte auf. Eine Wirkung auf LDH-1, -2, -3 und -4 konnte nicht festgestellt werden.

In der Studie von Tomczyk et al. (2024) wurde untersucht, inwiefern sich eine langfristige Omega-3-Fettsäuresupplementierung während des Ausdauertrainings auf den Tryptophanmetabolismus und den mentalen Zustand von gesunden Amateurläufern auswirkt. Im Rahmen der Studie wurden 40 männliche Amateurläufer (Interventionsgruppe: 37 ± 3 Jahre Kontrollgruppe: 37 ± 4 Jahre) untersucht, von denen 26 die zwölfwöchige Studie erfolgreich beendeten. Die Interventionsgruppe ($n = 14$) nahm täglich 2.234 mg EPA und 930 mg DHA auf, während die Kontrollgruppe MCT mit einer Dosierung von 4.000 mg verabreicht bekam. Des Weiteren wurde eine Kontrollgruppe mit elf Männern (38 ± 6) untersucht, die einen inaktiven Lebens- und Arbeitsstil aufwiesen. Die Kontrollgruppe supplementierte die gleiche Menge an EPA und DHA wie auch die Interventionsgruppe. Es wurde ein signifikanter Anstieg des Plasma-EPA und -DHA verzeichnet ($p < 0,01$), jedoch keine signifikanten Änderungen beim Tryptophanmetabolismus. Die trainierende Interventions- und Kontrollgruppe absolvierte dreimal pro Woche ein Lauftraining sowie einmal pro Woche ein funktionales Training mit unterschiedlichen Intensitäten. Nach Abschluss der Intervention konnten bei der trainierenden Interventionsgruppe signifikant höhere EPA- und DHA-Spiegel in den roten Blutzellen und im Plasma nachgewiesen werden ($p < 0,01$). Es konnte eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Interventionsgruppe und der Zeit für 3-HK beobachtet werden ($p = 0,01$). Des Weiteren konnte ein statistisch signifikanter Anstieg des PA-Spiegels beobachtet werden ($p = 0,01$). Außerdem konnten in der Interventionsgruppe nicht statistisch signifikante, jedoch positive Entwicklungen hinsichtlich der Konzentrationen von KYNA ($p = 0,06$), XA ($p = 0,07$) sowie 3-HAA ($p = 0,06$) beobachtet werden. Das Verhältnis von KYN + 3-HK zu XA + PA im Plasma zeigte in der Interventionsgruppe einen signifikanten Rückgang ($p = 0,004$). Nach der Supplementierung konnte ein signifikanter Rückgang des Verhältnisses von 3-HK zu PA festgestellt werden ($p = 0,002$). Allerdings wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen beobachtet. Die Veränderung des EPA-Gehalts korrelierte positiv mit den Änderungen der Plasmawerte von 3-HK ($p = 0,02$), PA ($p = 0,01$) und 3-HAA ($p = 0,02$). In der Kontrollgruppe konnten signifikante positive Korrelationen zwischen den Änderungen von XA und den Ausgangswerten von EPA ($r = 0,56$; $p = 0,05$), DHA ($r = 0,56$; $p = 0,05$) sowie EPA im Plasma ($r = 0,71$; $p = 0,05$) festgestellt werden. Es wurden keine signifikanten intergruppalen Veränderungen in der Stimmung der Teilnehmer vor und nach der Stressinduktion festgestellt. Auch konnten in beiden trainierenden Gruppen keine Veränderungen in der Plasmakonzentration des proinflammatorischen Zytokins IL-6 verzeichnet werden.

In der Studie von Nieman et al. (2009) wurden in Bezug auf die in dieser Arbeit definierten indirekten Parameter keine signifikanten Veränderungen bei IL-6, -8 und -10 sowie TNF- α beobachtet, die bei

beiden Gruppen nach dem Training erhöht waren ($p < 0.001$). Ebenfalls keine Veränderung gab es beim Plasma-EPA und -DHA. Es konnte ein signifikanter Anstieg des Plasma-ALA verzeichnet werden ($p < 0,001$).

6 Diskussion

Diese Arbeit wurde anhand einer systematischen Literaturrecherche aufgebaut und bezieht sechs Studien ein, die die Auswirkungen einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung auf direkte und indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit bei Ausdauerdauersportlern untersuchen. Dieses Kapitel dient der Interpretation und Auswertung dieser. Nach Darlegen der Zusammenhänge folgt eine Schlussfolgerung mit konkreten Supplementierungsmengen für Nahrungsergänzungsmittelverreiber und Ausdauerathleten abgeleitet werden. Hierzu werden zunächst die Ergebnisse und die Methodik der Studien diskutiert. Anschließend kommuniziert die Autorin Limitationen dieser Arbeit.

6.1 Diskussion der Ergebnisse

6.1.1 Diskussion der Effekte auf direkte Parameter

Die Auswertung der Studien, welche die direkten Parameter untersuchten, lässt den Schluss zu, dass Omega-3-Fettsäuren einen geringeren Einfluss auf diese zu haben scheinen. Die Studie von Morishima et al. (2020) zeigt keine signifikanten Veränderungen hinsichtlich diverser direkter Parameter. Demgegenüber weisen die Ergebnisse der Studie von Ramos-Campo et al. (2020) auf eine Verringerung der Schmerzwerte in Bezug auf Muskelkater hin. In beiden Studien wurde die Muskelausdauer anhand einer repetitiven Kniestreckung evaluiert. Allerdings unterscheiden sich die Studien in der Dosierung der supplementierten EPA- und DHA-Mengen. In der Studie von Ramos-Campo et al. (2020) wurde eine achtmal höhere DHA-Dosis verabreicht als in der Studie von Morishima et al. (2020). Dies könnte darauf hindeuten, dass eine erhöhte DHA-Supplementierung mit geringeren Schmerzwerten in Bezug auf Muskelkater assoziiert ist. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass sich die Studienlänge unterscheidet. Während die Intervention bei Morishima et al. (2020) über acht Wochen erfolgte, erstreckte sich die Studie von Ramos-Campo et al. (2020) über einen Zeitraum von zehn Wochen, mit einer vierwöchigen Auswaschphase und weiteren zehn Wochen. Die signifikant geringeren Schmerzwerte decken sich größtenteils mit den Ergebnissen des systematischen Reviews von Lewis et al. (2020). Die Resultate lassen den Schluss zu, dass sich die Symptome von Muskelkater reduzieren. Eine eindeutige Aussage über die Auswirkung von Omega-3-Fettsäuren auf das Empfinden von Muskelkater kann jedoch nicht getroffen werden, da die Ergebnisse der systematischen Review eine hohe Variabilität aufweisen. Dies könnte auf die Dauer der Intervention oder die Menge der supplementierten Omega-3-Fettsäuren zurückzuführen sein. Die Menge an EPA schwankt zwischen 300 und 2400 Milligramm, während die Menge an DHA zwischen 400 und 1500 Milligramm liegt.

In einer weiteren Studie wurde die Wirkung von Omega-3-Fettsäuren auf das Empfinden von Muskelkater untersucht. Dazu wurden 14 gesunde Männer nach einer vierwöchigen Interventionsphase gebeten, ein 60-minütiges Bergablaufprotokoll (65 % $\text{VO}_{2\text{max}}$, -10 % Gefälle) durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Studie deuten darauf hin, dass der wahrgenommene Muskelkater in der Interventionsgruppe signifikant geringer war. Eine Leistungsverbesserung konnte nicht beobachtet werden. Allerdings könnte ein geringerer Muskelkater dazu führen, dass es weniger häufig zu einer Trainingsvermeidung kommt (Kyriakidou et al., 2021). Die Ergebnisse sind jedoch aufgrund der geringen Stichprobengröße mit einer eingeschränkten Aussagekraft zu betrachten.

Die maximale freiwillige isometrische Kontraktion wies in der Studie von Morishima et al. (2020) keine signifikante Veränderung auf und entspricht somit den Resultaten von Kyriakidou et al. (2021). Gegenstand der Untersuchung waren die Auswirkungen einer Omega-3-Supplementierung auf trainingsinduzierte Muskelschäden. Allerdings sind die Interventionszeiträume beider Studien mit vier beziehungsweise acht Wochen relativ kurz und die Teilnehmeranzahl gering, weshalb weitere Forschung in diesem Bereich empfehlenswert ist.

Des Weiteren konnte in der Studie von Morishima et al. (2020) keine signifikante Veränderung der Laktatkonzentration nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den Resultaten einer Metaanalyse von Xin et al. (2021), welche die Auswirkungen einer Omega-3-Supplementierung auf durch Bewegung bedingte Muskelschäden und indirekte Blutmarker untersuchte. In dieser konnte eine Reduktion der Laktatdehydrogenase, des Enzyms, welches die Umwandlung von Pyruvat zu Laktat katalysiert und somit den Laktatspiegel beeinflusst, festgestellt werden. Die für die Meta-Analyse ausgewählten Studien wiesen eine Omega-3-Fettsäuredosierung zwischen 0,8 und 3 g täglich auf. Insofern liegt die Supplementierungsmenge bei Morishima et al. (2020) mit insgesamt 860 mg DHA und EPA am unteren Ende des in der Literatur diskutierten Spektrums. Die Forschenden von Morishima et al. (2020) weisen bereits zu Beginn ihrer Arbeit auf die geringe Dosierung in Bezug auf die Muskelausdauer hin und empfehlen weitere Forschung mit höheren Mengen.

Die Studie von Tsuji et al. (2023) demonstriert eine signifikante Erhöhung der Zeit bis zur Erschöpfung, des anaeroben Schwellenwerts in der Gesamtbelastung des Trainings bei 50 % des $\text{VO}_{2\text{max}}$ sowie der Dauer bis zur anaeroben Schwelle. Diese Resultate legen nahe, dass eine Supplementierung von verestertem EPA und DHA im Rahmen eines moderaten Ausdauertrainings die Ausdauerleistung potenziell verbessern könnte. Allerdings wurde in diesem RCT ebenfalls die Wirkung von veresterten mittelkettigen Triglyceriden (MCT) untersucht. Eine Studie, die die Auswirkungen einer zweiwöchigen Supplementierung von 6 g MCT-haltigen Nahrungsmitteln bei Freizeitsportlern untersuchte, beobachtete eine erhöhte Fettoxidation sowie erhöhte Zeit bis zur Erschöpfung bei einer Belastung von 70 % $\text{VO}_{2\text{max}}$ (Nosaka et al., 2018).

Die weiteren direkten Leistungsparameter, wie die maximalen Wiederholungsraten, die Gesamtbelastung während des Ausdauertests, die Laufzeit und Distanz bis zur Erschöpfung sowie die Gesamtbelastung während des Trainings bei 80 % des $\text{VO}_{2\text{max}}$ zeigen keine signifikante Veränderung und korrelieren mit der systematischen Übersichtsarbeit von Lewis et al. (2020), welche die Auswirkungen einer Fischöl-Supplementierung auf unterschiedliche physiologische und gesundheitliche Parameter bei Athleten untersuchte. Es konnten keine eindeutigen Effekte auf die direkte Ausdauerleistung nachgewiesen werden. Zu diesem Ergebnis kam auch ein RCT, in dem 16 trainierte Radfahrer vor und nach der Supplementierung Tests zum $\text{VO}_{2\text{max}}$ und anhaltende submaximale Belastungstests bei 55 % der maximalen Arbeitslast durchführten (Peoples et al., 2008).

In der Studie von Nieman et al. (2009) erfolgt die Supplementierung von Omega-3 ausschließlich in Form von Chiasamenöl. Da Chiasamen eine pflanzliche Omega-3-Fettsäurenquelle sind, enthalten diese ALA und kein EPA und DHA. Wie in Kapitel 2.1 bereits dargelegt, liegt die Umwandlungsrate von ALA zu EPA bei gesunden Erwachsenen im Durchschnitt bei 8–12 %, während die Rate von ALA zu DHA >1 % beträgt (Leitzmann & Keller, 2020, S.331). Dies könnte eine mögliche Erklärung für die Ergebnisse sein, die – abgesehen von einem signifikant erhöhten Plasma-ALA und einer erhöhten Herzrate in der Interventionsgruppe – keine signifikanten Unterschiede aufweisen (Nieman et al., 2009).

Ein RCT, in dem die Auswirkungen einer Supplementierung von Fischöl auf die Herzrate und den Sauerstoffverbrauch untersucht wurden, ergab, dass die Herzrate im Vergleich zur Kontrollgruppe über einen Interventionszeitraum von acht Wochen signifikant sank (Peoples et al., 2008). Das Resultat steht im Widerspruch zu dem von Nieman et al. (2009) und lässt sich möglicherweise durch die Auswahl der Omega-3-Fettsäurequelle erklären, da das in der Studie verwendete Fischöl einen hohen Gehalt an EPA und DHA aufweist.

Diese uneinheitlichen Ergebnisse deuten auf eine starke Abhängigkeit von Dosierung und Dauer der Omega-3-Fettsäuresupplementierung hin, die möglicherweise auch von der Art der körperlichen Belastung abhängt. Allerdings wurden sowohl in Tsuji et al. (2023) als auch Morishima et al. (2020) die gleichen Mengen EPA und DHA über den gleichen Zeitraum supplementiert. Bei den gemessenen direkten Parametern (Zeit bis zur Erschöpfung, dem anaeroben Schwellenwert bei mittlerer Ausdauerbelastung und der Dauer bis zur anaeroben Schwelle) in Tsuji et al. (2023) könnte es also bereits mit niedrigeren Dosierungen zu signifikanten Veränderungen kommen. Allerdings können ebenfalls die in dieser Studie supplementierten veresterten MCT einen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Die Unterschiede in den Resultaten zwischen Studien, die unterschiedliche Mengen an EPA und DHA verwenden, legen nahe, dass eine höhere Dosierung von DHA einen potenziellen Nutzen hinsichtlich der Reduktion von Muskelkater bieten könnte.

6.1.2 Diskussion der Effekte auf indirekte Parameter

In Bezug auf die indirekten Parameter lässt sich feststellen, dass eine Omega-3-Fettsäuresupplementierung einen höheren Einfluss zu haben scheint. In der Studie von Żebrowska et al. (2021) wurde ein niedrigeres AA/EPA-Verhältnis sowie ein niedrigerer AA-Gehalt beobachtet, was auf eine verringerte entzündliche Aktivität hindeuten könnte. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Omega-6-Fettsäure AA an zahlreichen Entzündungsprozessen beteiligt ist, während EPA entzündungshemmend wirkt (Leitzmann & Keller, 2020, S. 331). Der signifikant verringerte TNF- α -Spiegel lässt ebenfalls auf eine reduzierte Entzündungsaktivität schließen. Allerdings konnte in der Studie von Ramos-Campo et al. (2020) kein signifikanter Unterschied zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe festgestellt werden, obwohl sich der Interventionszeitraum deutlich unterscheidet und bei den Probanden von Żebrowska et al. (2021) bereits nach drei Wochen signifikante Unterschiede im TNF- α -Spiegel gemessen wurden. Aufgrund sich unterscheidender Parameter hinsichtlich des Studiendesigns lässt sich eine Differenz in der Supplementierungsmenge von EPA feststellen. Während die Teilnehmer der Studie von Żebrowska et al. (2021) eine Menge von 852 mg EPA pro Tag erhielten, wurde in der Studie von Ramos-Campo et al. (2020) eine Dosis von 240 mg EPA pro Tag gewählt. Diese heterogenen Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen der systematischen Übersichtsarbeit von Lewis et al. (2020), die einen konsistenten Effekt bezüglich der Reduktion von TNF- α in den untersuchten Studien feststellte. Die systematische Review von Fernández-Lázaro et al. (2024) stellte keine signifikante Veränderung in zwei der drei untersuchten Studien in Bezug auf TNF- α fest, allerdings führte eine der Studien ein Krafttraining mit maximal sechs maximalen exzentrischen Ellbogenbeugeübungen durch. Bei der zweiten Studie handelt es sich um die von Nieman et al. (2009), die, wie bereits erwähnt, ALA-reiche Chiasamen supplementierte und die Umwandlungsrate zu EPA und DHA sehr gering ist (Leitzmann & Keller, 2020, S.331).

Des Weiteren konnte bei Żebrowska et al. (2021) ein signifikanter Anstieg der Serum- α -Tocopherolspiegel beobachtet werden, was auf eine potenzielle Verbesserung der antioxidativen Abwehr hindeuten könnte. Dies ist jedoch der Tatsache geschuldet, dass neben einer Supplementierung von EPA und DHA ebenfalls täglich 70 mg Vitamin E supplementiert wurden. Die Forschenden der Studie führen dies auf eine im Jahr 2000 durchgeführte Literaturübersicht zurück, in der der Zusammenhang zwischen der Einnahme von Omega-3-Fettsäuren und Vitamin E untersucht wurde. Die antioxidativen Eigenschaften von Vitamin E verhindern laut der Review von Valk und Hornstra (2000) die Oxidation von Gewebe-PUFA. Allerdings basiert die Review von größtenteils auf Tierversuchen und es gab zu diesem Zeitpunkt noch keine systematische Untersuchung zur Vitamin-E-Anforderung in Bezug auf die Einnahme von PUFA.

Eine Meta-Analyse von 2020 verzeichnete allerdings eine erhöhte antioxidative Kapazität und eine Verbesserung des Stickstoffoxids bei einer gleichzeitigen Omega-3-Fettsäure- und Vitamin E-

Supplementierung, während gleichzeitig ein signifikanter Rückgang von MDA beobachtet wurde (Sepidarkish et al., 2020). Die Meta-Analyse bezog sich jedoch nicht explizit auf Ausdauerathleten, sodass eine Eingrenzung der Zielgruppe für die weitere Forschung nötig ist, um die Ergebnisse aus dieser Arbeit zu bestätigen.

In der Studie von Żebrowska et al. (2021) konnte eine signifikante Erhöhung bei GSH, GPx und SOD nachgewiesen werden. Diesbezüglich ist zu vermerken, dass die SOD-Aktivität nach der Intervention eine signifikante Reduktion erfuhr, was möglicherweise auf eine Anpassung des Körpers zurückzuführen ist. Bei Żebrowska et al. (2021) wurde eine positive Korrelation zwischen SOD und GPx und dem Lipidperoxidationsmarker MDA beobachtet. Das könnte laut Forscher darauf hindeuten, dass der durch einen erhöhten Fettsäurekonsum induzierte oxidative Stress für die erhöhte enzymatische und nicht enzymatische Abwehr verantwortlich sein könnte.

In der systematischen Übersichtsarbeit von Lewis et al. (2020) erfolgte eine Untersuchung der Enzyme GPx und SOD. Die zwei oxidativen Stressmarker wiesen in drei für die systematische Übersichtsarbeit einbezogenen RCTs erhöhte Werte auf, während sie in zwei signifikant verringert waren. Diese heterogenen Ergebnisse könnten an unterschiedlichen Messzeitpunkten liegen.

In der systematischen Übersichtsarbeit von Fernández-Lázaro et al. (2024) wurde in einem RCT GSH untersucht, welches in der Interventionsgruppe höher als in der Kontrollgruppe war. Dieses Resultat bestätigt die Ergebnisse dieser Arbeit.

Die HDL-Cholesterin(HDL-C)-Level sind bei Żebrowska et al. (2021) signifikant erhöht. Es wurde außerdem eine Tendenz zur Senkung des LDL-C beobachtet. Allerdings sank die Konzentration der Triglyceride in beiden Gruppen, sodass die Omega-3-Fettsäuresupplementierung möglicherweise nicht mit dieser Veränderung assoziiert werden kann.

Ein erhöhter Triglyceridspiegel scheint ein kausaler Faktor für atherosklerotische Herz-Kreislauferkrankungen zu sein. Zwar wurden Omega-3-Fettsäuren in multiplen Studien mit einer Senkung von Triglyceriden in Verbindung gebracht (Rodriguez et al., 2022). Jedoch wird Ausdauertraining ebenfalls eine akute Senkung der Triglyceride und Erhöhung der HDL-C-Spiegel zugeschrieben (Thompson et al., 2001). Niedrige HDL-C-Level sind laut einer systematischen Review von prospektiven Kohortenstudien mit einer erhöhten Sterblichkeit durch Herz-Kreislauf-Krankheiten verbunden (Jung et al., 2022).

In der dreiwöchigen Studie von Żebrowska et al. (2021) konnten signifikant erhöhte MDA-Spiegel in der Interventionsgruppe nachgewiesen werden. Dieser Befund deckt sich mit den Ergebnissen von Lewis et al. (2020), da die Ergebnisse der Studienauswertung eine homogene Erhöhung der MDA-Spiegel zeigten.

Ein Anstieg der MDA-Spiegel weist laut Fernández-Lázaro et al. (2024) auf die Wirkung freier Radikale bei der Lipidperoxidation hin. In der systematischen Übersichtsarbeit wurde eine Senkung der MDA-Spiegel beobachtet, was auf die antioxidative Kapazität der Omega-3-Fettsäuren hindeutet und unter anderem durch die erhöhte SOD-Aktivität unterstützt wird. Diese heterogenen Ergebnisse bedürfen weiterer Forschung.

Des Weiteren konnten signifikante Unterschiede im Vergleich zur Kontrollgruppe hinsichtlich der NRG4-Spiegel, der Serumadiponektinspiegel sowie der Serumleptinspiegel beobachtet werden. Die Erhöhung der Adiponektin- sowie NRG4-Werte resultierte in einer positiven Beeinflussung des Lipidprofils im Blut, der Entzündungsmarker sowie der antioxidativen Abwehr (Żebrowska et al., 2021).

In der vorliegenden Literatur konnte keine Drittliteratur identifiziert werden, die Ausdauerathleten als Zielgruppe eingrenzt und die sportliche Leistungsfähigkeit misst. In einer doppelblinden, randomisierten Studie aus dem Jahr 2014 wurde die Wirkung von Omega-3-Fettsäuren auf die Leptin- und Adiponektinkonzentration bei Patienten mit Rückenmarksverletzung untersucht. Im Rahmen der Studie wurden 104 Patienten über einen Zeitraum von 14 Monaten begleitet. Die Supplementierung von EPA und DHA hatte keinen Einfluss auf Leptin, jedoch konnte in der Interventionsgruppe eine signifikante Abnahme der Adiponektinkonzentration beobachtet werden (Sabour et al., 2014).

Allerdings unterscheiden sich die supplementierten Mengen zwischen den beiden Studien, da bei Żebrowska et al. (2021) 852 mg EPA und 1602 mg DHA supplementiert wurden, während die Interventionsgruppe bei Sabour et al. (2014) lediglich 126 mg EPA und 930 mg DHA einnahm. In Bezug auf die Auswirkung von Omega-3-Fettsäuren auf die Leptinkonzentration besteht weiterhin Forschungsbedarf.

In der Studie von Ramos-Campo et al. (2020) wurden neben den direkten Parametern auch indirekte, insbesondere Entzündungs- und Muskelschädigungsmarker, untersucht. Die Konzentrationen der Entzündungsmarker IL-1 β und IL-6 haben sich signifikant reduziert, was auf eine verminderte Entzündungsreaktion hindeutet. In der Studie von Nieman et al. (2009) wurden ebenfalls verschiedene Entzündungsmarker gemessen, jedoch konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Diesbezüglich ist wiederholt ein Zusammenhang mit der Omega-3-Fettsäurequelle ALA denkbar. Die unterschiedlichen Resultate dieser Arbeit korrelieren mit den Befunden der systematischen Literaturübersicht von Lewis et al. (2020), in deren Rahmen diverse Parameter bei Athleten untersucht wurden, darunter die Entzündungsmarker CRP, IL-6 und TNF- α . Obgleich einige Studien positive Resultate und somit eine Reduktion von Entzündungsmarkern durch die Supplementierung von Omega-3-Fettsäuren verzeichneten, gab es jedoch in anderen auch keine signifikanten Veränderungen. Dies lässt sich möglicherweise auf unterschiedliche Dosierungsmengen oder Interventionsdauern zurückführen. Während bei Tomczyk et al. (2024) keine signifikante Veränderung der IL-6-

Werte festgestellt wurde, konnte bei Ramos-Campo et al. (2020) eine signifikante Verringerung beobachtet werden. Letztere verabreichten eine DHA-Dosis von 2,1 g, während bei Tomczyk et al. (2024) eine DHA-Menge von 930 mg supplementiert wurde. Die bei Tomczyk et al. (2024) hohe Menge an supplementiertem EPA (2,23 g) scheint keinen Einfluss auf IL-6 auszuüben. Im Gegensatz dazu wurde EPA bei Ramos-Campo et al. (2020) mit einer Dosis von 240 mg supplementiert. Allerdings unterscheidet sich neben der Supplementierungsmenge auch die Dauer der Interventionen. Der Supplementierungszeitraum von Ramos-Campo et al. (2020) erstreckte sich über einen Zeitraum von zehn Wochen und könnte somit einen signifikanten Effekt auf den Entzündungsmarker aufweisen. Die systematische Review von Fernández-Lázaro et al. (2024) verzeichnete in der großen Mehrheit der untersuchten Studien ebenfalls einen signifikanten Rückgang von IL-6 und erwähnt hierbei, dass bei diesen Studien ein längerer Supplementierungszeitraum vorlag.

Bei den Muskelschädigungsmarkern lassen sich in der Untersuchung von Ramos-Campo et al. (2020) signifikante Senkungen der Werte von CPK und LDH-5 feststellen, was auf eine geringere Muskelschädigung hindeutet. In Bezug auf die CPK-Werte wurden in vier der in der systematischen Übersichtsarbeit von Lewis et al. (2020) untersuchten Studien identische Resultate festgestellt, was die vorliegenden Ergebnisse unterstreicht.

Die in der Studie von Tomczyk et al. (2024) festgestellten, nicht signifikant veränderten KYNA-Werte stehen im Widerspruch zu den Resultaten einer kontrollierten klinischen Studie aus dem Jahr 2016, welche die Auswirkungen von Ausdauertraining auf den KYNA-Stoffwechsel untersuchte. In der ersten Stunde nach dem Ausdauertraining wurde ein erhöhter KYNA-Wert verzeichnet, was darauf hindeutet, dass regelmäßiges Ausdauertraining zu Anpassungen im Kynureninstoffwechsel führt (Schlittler et al., 2016).

Die heterogenen Ergebnisse lassen sich möglicherweise darauf zurückführen, dass die einzelnen Tryptophanmetabolitenspiegel bei Tomczyk et al. (2024) nicht direkt nach der Ausdauerinheit, sondern erst nach Abschluss der zwölfwöchigen Intervention gemessen wurden. Obgleich die Interaktionen zwischen der Interventionsgruppe und der Zeit für KYNA statistisch nicht signifikant sind, lassen sich dennoch mittlere bis größere Interaktionen beobachten, die möglicherweise mit einer größeren Teilnehmerzahl statistische Signifikanz erlangen würden.

Die Studie von Schlittler et al. (2016) wirft die Frage auf, ob eine Omega-3-Supplementierung zur Erhöhung der KYNA-Werte notwendig ist, da bereits alleiniges Ausdauertraining zu positiven Effekten führte. Auch die Tatsache, dass sich die Tryptophanmetaboliten in der Kontrollgruppe von Tomczyk et al. (2024), die die gleiche Menge an EPA und DHA wie die Interventionsgruppe supplementierte, jedoch physisch inaktiv war, nicht signifikant veränderten, könnte damit zusammenhängen, dass das Ausdauertraining zu einer signifikanten Erhöhung von 3-HK und PA führt.

Die signifikante Erhöhung der PA-Spiegel im Plasma in der Interventionsgruppe von Tomczyk et al. (2024) wird als Marker für eine adaptive Reaktion auf das Training interpretiert. Dies begründet sich darin, dass PA die Umwandlung von Dopamin zu Noradrenalin hemmt und neuroprotektive Effekte aufweist. Gleichzeitig konnte ein signifikanter Anstieg des neurotoxischen Metaboliten 3-HK beobachtet werden. Allerdings wurde ebenfalls ein Rückgang des Verhältnisses von neurotoxischen zu neuroprotektiven Metaboliten verzeichnet, was darauf hindeutet, dass eine Omega-3-Fettsäuresupplementierung möglicherweise neuroprotektive Effekte hat. In der Interventionsgruppe konnten ebenfalls größere Interaktionen für KYNA, 3-HAA und eine mittlere Interaktion für XA festgestellt werden, welche jedoch alle nicht statistisch signifikant waren. Es besteht aber die Möglichkeit, dass diese Ergebnisse auf neuroprotektive Effekte einer Omega-3-Supplementierung hinweisen.

Darlington et al. (2010) konnten bei unterschiedlichen neurologischen Erkrankungen einen Rückgang der 3-HAA-Spiegel verzeichnen. Aufgrund der geringen Kenntnisse über die Wirkung von Omega-3-Fettsäuren wird angeregt, künftige Forschungsanstrengungen in diesem Bereich zu intensivieren.

Die mentale Stimmung wurde bei Tomczyk et al. (2024) anhand einer Mood Adjective Check List ermittelt, welche Aufschluss über die energetische sowie angespannte Erregung sowie den hedonischen Ton gibt. Die Forscher konnten eine positive Stimmung in der Mehrheit der Teilnehmer beobachten und keine signifikanten Unterschiede zwischen der Interventions- und Kontrollgruppe feststellen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit einer Studie von Giles et al. (2015), in der die Auswirkungen einer Omega-3-Fettsäure-Supplementierung auf stressinduzierte Veränderungen der Stimmung, Kognition und physiologischer Stressmarker bei gesunden jungen Erwachsenen untersucht wurden. Die tägliche Einnahme von Fischöl hatte kaum einen Effekt auf die Stimmung.

Auch in einer randomisierten klinischen Studie, welche die Auswirkungen einer Supplementierung von Omega-3-Fettsäuren auf das Depressionsrisiko und die Stimmung untersuchte, konnten ähnliche Ergebnisse beobachtet werden. Die 18.353 Teilnehmerinnen und Teilnehmer im Alter von mindestens 50 Jahren nahmen im Durchschnitt über einen Zeitraum von 5,3 Jahren entweder Fischöl oder ein Placebo ein. Hinsichtlich des Depressionsrisikos lassen sich die Ergebnisse der Interventionsgruppe als leicht signifikant höher beschreiben. In Bezug auf die Stimmungswerte konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Diese Ergebnisse lassen sich jedoch möglicherweise nicht auf jüngere Altersgruppen übertragen (Okereke et al., 2021).

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontroll- und der Interventionsgruppe auf. Dies lässt sich möglicherweise darauf zurückführen, dass beide Gruppen dreimal pro Woche eine Laufeinheit sowie einmal pro Woche ein funktionales Training absolvierten (Tomczyk et al., 2024).

Die Wirkung von Sport auf die psychische Gesundheit wurde bereits in zahlreichen Studien untersucht, wobei sich ein konsistenter Zusammenhang zwischen regelmäßiger Bewegung und positiven

Effekten auf Depressionen, Angstzustände und Stress sowie der Freisetzung von Endorphinen zeigte (Ruegsegger & Booth, 2017).

In der Studie von Morishima et al. (2023) konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des systolischen und diastolischen Blutdrucks zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe festgestellt werden.

Die Ergebnisse einer Meta-Analyse von Zhang et al. (2022) legen nahe, dass eine Veränderung der Dosierung von Omega-3-Fettsäuren mit Veränderungen im Blutdruck einhergeht. Für die Analyse wurden Daten aus 71 Studien herangezogen. Die Wissenschaftler konnten eine signifikante Senkung des systolischen und diastolischen Blutdrucks bei einer Omega-3-Fettsäuresupplementierung beobachten. Es konnte festgestellt werden, dass eine höhere Dosis der Omega-3-Fettsäuren proportional zu einer Senkung des Blutdrucks verläuft. Allerdings reagieren Personen mit einem hohen Risiko für die Entwicklung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen möglicherweise stärker auf die positiven Auswirkungen der Supplementierung. Im Rahmen der Studie wurde eine durchschnittliche tägliche Dosis von 2,8 g EPA und DHA von den Teilnehmern eingenommen.

Die Ergebnisse der Studie von Morishima et al. (2024), welche keine signifikanten Unterschiede zwischen der Interventions- und der Kontrollgruppe aufzeigten, könnten mit der im Vergleich geringen Dosis von 650 mg EPA und 260 mg DPA in Verbindung stehen.

6.1.3 Limitationen der ausgewählten Studien

Die in die Untersuchung einbezogenen Studien sind aufgrund verschiedener methodischer Limitationen, darunter die Größe der Studienpopulation, die Dauer der Intervention, die unterschiedlichen Dosierungen der Supplementierung sowie die Heterogenität der untersuchten Populationen, mit gewissen Einschränkungen behaftet. Dies führt zu einer Beeinträchtigung der Generalisierbarkeit der Ergebnisse.

Die Dauer der Studien erstreckt sich von drei bis 20 Wochen. Daher lassen sich alle Studien der Kategorie Kurzzeitstudien zuordnen, welche keine Aussagen zur Langzeitwirksamkeit einer Omega-3-Supplementierung auf die sportliche Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten treffen können. Für professionelle Ausdauerathleten können derartige Resultate jedoch von großem Einfluss auf deren Leistungsfähigkeit sein, sodass Studien mit längeren Interventionszeiträumen erforderlich sind, um eine langfristige Effektivität zu bestätigen.

Die Anzahl der Studienteilnehmer variiert nur geringfügig zwischen 15 und 26. Allerdings ist die statistische Power gering, was die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass zufällige Variationen die Ergebnisse beeinflussen. Aufgrund der geringen Trefferanzahl während der Literaturrecherche erfolgte

eine Erweiterung der Studienpopulation um Amateursportler und gesunde untrainierte Personen, wodurch eine größere Heterogenität bezüglich der untersuchten Gruppen entstand.

Die Teilnehmenden waren zwischen 19 und 55 Jahre alt und es waren sowohl Frauen als auch Männer vertreten, wobei ein Überhang an männlichen Teilnehmern zu verzeichnen war.

Der EPA-Gehalt variiert zwischen 600 mg und 2,23 g, während der DHA-Gehalt zwischen 240 mg und 1,6 g liegt. Dies kann zu unterschiedlichen Resultaten hinsichtlich der Veränderung der erfassten Parameter führen. Des Weiteren sind in der Nahrungergänzung von Żebrowska et al. (2021) zusätzlich noch Vitamin E sowie Vitamin D und in der von Ramos-Campo et al. (2020) α -Tocopherol und Glycerin enthalten. Dies kann ebenfalls Auswirkungen auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse haben. Auch die bei Tsuji et al. (2023) zusätzlich supplementierten (veresterten) MCT können einen Einfluss auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse haben.

Vier der sechs untersuchten Studien wurden doppelblind durchgeführt. In Bezug auf die Studien von Żebrowska et al. (2021) und Nieman et al. (2009) ist festzuhalten, dass diese nicht verblindet durchgeführt wurden. Dies kann zu einem Teilnehmer- sowie Forscher-Bias führen, was wiederum eine Verzerrung der Ergebnisse zur Folge hat.

6.2 Methodische Kritik

Die Methodik dieser Arbeit bestand aus einer systematischen Literaturrecherche, die darauf abzielte, einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu geben. Allerdings erlag diese einigen Limitationen. Die zu untersuchende Zielgruppe wurde aufgrund fehlender Ergebnisse auf Freizeitsportler und Nichtsportler erweitert, die während der Intervention ein entsprechendes Training durchführten. Diese Heterogenität der Stichgruppe führt zu einer eingeschränkten Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Es stellt sich die Frage, ob einige signifikante Unterschiede, die bei untrainierten gesunden Probanden beobachtet wurden, nicht ebenfalls bzw. ausschließlich auf die sportliche Aktivität zurückzuführen sind, anstatt auf die Omega-3-Fettsäuresupplementierung.

Die Suchstrategie dient dazu, eine breite Abdeckung der relevanten Literatur zu gewährleisten, wobei sowohl die Relevanz als auch die Qualität der Studien priorisiert wurden. Die Verwendung der Datenbank PubMed als primäre Informationsquelle ermöglichte den Zugriff auf eine Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass andere wissenschaftliche Datenbanken wie EMBASE oder MEDLINE weitere für die Forschungsfrage relevante Studien beinhalten. Durch die Kombination verschiedener Suchbegriffe mithilfe Boolescher Operatoren wurde eine präzise und umfassende Suche ermöglicht, wodurch die Wahrscheinlichkeit erhöht wurde, relevante Studien zu identifizieren. Jedoch muss an der Stelle erwähnt werden, dass eine Erweiterung der

Suchbegriffe hinsichtlich abweichender Begrifflichkeiten zu weiteren relevanten Studien hätte führen können. Während der Recherche stellte die Autorin fest, dass eine Supplementierung von Omega-3-Fettsäuren häufig unter dem Begriff *fish oil* auftritt. Dieser Begriff wurde jedoch während der systematischen Literaturrecherche nicht berücksichtigt. Es ist anzunehmen, dass eine vollständige Berücksichtigung des gesamten Forschungsstandes nicht gegeben ist.

Es wurden ausschließlich qualitativ hochwertige Studiendesigns berücksichtigt, insbesondere RCTs, die oft doppelblind und placebokontrolliert waren, um einen hohen Evidenzgrad sicherzustellen. Dadurch wird ebenfalls eine Vergleichbarkeit zwischen den Studien erzeugt.

Die Vollständigkeit der Ergebnisse kann durch die Beschränkung auf deutsch- und englischsprachige Literatur eingeschränkt sein, da relevante Forschungsergebnisse in anderen Sprachen unberücksichtigt blieben. Außerdem wurden ausschließlich frei zugängliche Studien einbezogen, sodass möglicherweise entscheidende Studienergebnisse und Perspektiven keine Relevanz in dieser Arbeit erhielten. Diese Einschränkungen können zu einem Auswahl-Bias und somit zu einer Verzerrung der Resultate führen.

7 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse in Bezug auf direkte Parameter zeigen, dass bis jetzt nur wenige und nicht konstante Effekte nachweisbar sind, die nur eingeschränkt ausreichen, um Omega-3-Fettsäuren eine leistungssteigernde Wirkung im Ausdauersport zuzuschreiben. Während drei Studien teilweise signifikante Unterschiede in der Interventionsgruppe feststellen konnten, zeigte eine Studie keine signifikanten Veränderungen wie beispielsweise der maximalen isometrischen Kontraktion oder der Laktatkonzentration. Zukünftige Forschung sollte hinsichtlich der direkten Parameter größere Stichproben, längere Supplementierungszeiträume sowie höhere Dosierungen einsetzen, um aussagekräftigere Resultate zu erlangen. Auch könnte eine alleinige Supplementierung von DHA bezogen auf reduzierte Muskelschmerzen nach dem Training ein künftiges Forschungsgebiet darstellen.

Die Ergebnisse der indirekten Parameter zeigt einen potenziell signifikanten Einfluss von Omega-3-Fettsäuren, insbesondere EPA und DHA, auf entzündungshemmende und antioxidative Prozesse sowie auf Muskelschädigungsmarker. Die signifikante Abnahme von Entzündungsmarkern, insbesondere TNF- α und IL-6, wurde teilweise beobachtet. Dies legt nahe, dass sich die in der Wissenschaft etablierten entzündungshemmenden Eigenschaften von Omega-3-Fettsäuren ebenfalls auf die Gesundheit und das Wohlbefinden von Ausdauerathleten auswirken können.

Allerdings sind die Ergebnisse nicht in allen Studien konsistent, was auf unterschiedliche Dosierungen, Interventionszeiträume und Studiendesigns zurückzuführen sein könnte. So korrelieren die in der Literatur beschriebenen positiven Effekte auf verschiedene Entzündungsmarker nicht immer mit den in dieser Arbeit analysierten Studien. Insbesondere die Studienlänge als auch die im Vergleich

geringe Dosierungsmenge in den untersuchten Studien wird jedoch teilweise bereits von den Forschern als methodische Kritik genannt. Die heterogenen Ergebnisse bedürfen weiterer Forschung, um die optimalen Dosierungsmengen und Supplementierungszeiträume für Omega-3-Fettsäuren zur Verbesserung der indirekten Parameter zu analysieren.

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Omega-3-Fettsäuren EPA und DHA mit einer Supplementierungsmenge von täglich 0,8-1 g EPA und 1-1,6 g DHA bereits potenziell antioxidative und entzündungshemmende Wirkungen auf indirekte Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit von Ausdauerathleten zeigen können. In Bezug auf die direkten Parameter scheinen die Dosierungen höher zu sein, jedoch kann aufgrund der inkonsistenten Ergebnisse keine abschließende Empfehlung getroffen werden.

8 Literaturverzeichnis

- Araújo, C. G. S. & Scharhag, J. (2016). Athlete: a working definition for medical and health sciences research. *Scandinavian Journal Of Medicine & Science in Sports, Volume 26*(Issue 1), 4–7. doi:10.1111/sms.12632
- Bradley, J. (2007). TNF-mediated inflammatory disease. *The Journal Of Pathology, 214*(2), 149–160. doi:10.1002/path.2287
- Cantó, C., Pich, S., Paz, J. C., Sanches, R., MartíNez, V., Orpinell, M., PalaciN, M., Zorzano, A. & Guma, A. (2007). Neuregulins Increase Mitochondrial Oxidative Capacity and Insulin Sensitivity in Skeletal Muscle Cells. *Diabetes, 56*(9), 2185–2193. doi:10.2337/db06-1726
- Cervenka, I., Agudelo, L. Z. & Ruas, J. L. (2017). Kynurenines: Tryptophan's metabolites in exercise, inflammation, and mental health. *Science, 357*(6349). doi:10.1126/science.aaf9794
- Chandran, M., Phillips, S. A., Ciaraldi, T. & Henry, R. R. (2003). Adiponectin: more than just another fat cell hormone? *Diabetes Care, 26*(8), 2442–2450. doi: 10.2337/diacare.26.8.2442
- Cordiano, R., Di Gioacchino, M., Mangifesta, R., Panzera, C., Gangemi, S. & Minciullo, P. L. (2023). Malondialdehyde as a Potential Oxidative Stress Marker for Allergy-Oriented Diseases: An Update. *Molecules, 28*(16), 5979. doi:10.3390/molecules28165979
- Cornelissen, V. A. & Smart, N. A. (2013). Exercise Training for Blood Pressure: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal Of The American Heart Association, 2*(1). doi:10.1161/jaha.112.004473
- Darlington, L. G., Forrest, C. M., Mackay, G. M., Smith, R. A., Smith, A. J., Stoy, N. & Stone, T. W. (2010). On the biological importance of the 3-hydroxyanthranilic acid: anthranilic acid ratio. *International Journal Of Tryptophan Research, 3*, 51–59. doi:10.4137/IJTR.S4282
- Del Rio, D., Stewart, A. J. & Pellegrini, N. (2005). A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress. *Nutrition Metabolism And Cardiovascular Diseases, 15*(4), 316–328. doi:10.1016/j.numecd.2005.05.003
- Elmadfa, I. (2019). *Ernährungslehre* (4. Aufl.). Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Elmadfa, I. & Leitzmann, C. (2003). *Ernährung des Menschen* (7. Aufl.). Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Englert, H. & Siebert, S. (2016). *Vegane Ernährung* (1. Aufl.). Bern: Haupt Verlag.
- Farhana, A. & Lappin, S. L. (2023, 1. Mai). *Biochemistry, lactate dehydrogenase*. StatPearls - NCBI Bookshelf. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK557536/>. Stand 03.09.2024.
- Fernández-Lázaro, D., Arribalzaga, S., Gutiérrez-Abejón, E., Azarbayjani, M. A., Mielgo-Ayuso, J. & Roche, E. (2024). Omega-3 Fatty Acid Supplementation on Post-Exercise Inflammation, Muscle Damage, Oxidative Response, and Sports Performance in Physically Healthy Adults—A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Nutrients, 16*(13), 2044. doi:10.3390/nu16132044

- Gammone, M., Riccioni, G., Parrinello, G. & D'Orazio, N. (2018). Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids: Benefits and Endpoints in Sport. *Nutrients*, 11(1), 46. doi:10.3390/nu11010046
- Giles, G. E., Mahoney, C. R., Urry, H. L., Brunyé, T. T., Taylor, H. A. & Kanarek, R. B. (2015). Omega-3 fatty acids and stress-induced changes to mood and cognition in healthy individuals. *Pharmacology Biochemistry And Behavior*, 132, 10–19. doi:10.1016/j.pbb.2015.02.018
- Glorieux, C. & Calderon, P. B. (2017). Catalase, a remarkable enzyme: targeting the oldest antioxidant enzyme to find a new cancer treatment approach. *Biological Chemistry*, 398(10), 1095–1108. doi: 10.1515/hsz-2017-0131
- Grant, R., Coggan, S. & Smythe, G. (2009). The Physiological Action of Picolinic Acid in the Human Brain. *International Journal Of Tryptophan Research*, 2, IJTR.S2469. doi:10.4137/ijtr.s2469
- Graziano, F., Juhasz, V., Brunetti, G., Cipriani, A., Szabo, L., Merkely, B., Corrado, D., D'Ascenzi, F., Vago, H. & Zorzi, A. (2022). May Strenuous Endurance Sports Activity Damage the Cardiovascular System of Healthy Athletes? A Narrative Review. *Journal Of Cardiovascular Development And Disease*, 9(10), 347. doi:10.3390/jcdd9100347
- Güllich, A. & Krüger, M. (2022). *Sport*. Heidelberg: Springer Spektrum.
- Hauner, H., Hartmann, T. & Kersting, M. (2007). Omega-3-Fettsäuren aktuell - Konsequenzen und Perspektiven für die Ernährungsberatung. In VDD, *Ernährungs Umschau* (Bd. 8, Nummer 07, S. 482–483). https://www.ernaehrungs-umschau.de/fileadmin/Ernaehrungs-Umschau/pdfs/pdf_2007/08_07/EU08_482_485.qxd.pdf. Stand 03.09.2024.
- Hirano, T. (2020). IL-6 in inflammation, autoimmunity and cancer. *International Immunology*, 33(3), 127–148. doi:10.1093/intimm/dxaa078
- Jung, E., Kong, S. Y., Ro, Y. S., Ryu, H. H. & Shin, S. D. (2022). Serum Cholesterol Levels and Risk of Cardiovascular Death: A Systematic Review and a Dose-Response Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 19(14), 8272. doi:10.3390/ijerph19148272
- Kawabata, F., Neya, M., Hamazaki, K., Watanabe, Y., Kobayashi, S. & Tsuji, T. (2014). Supplementation with eicosapentaenoic acid-rich fish oil improves exercise economy and reduces perceived exertion during submaximal steady-state exercise in normal healthy untrained men. *Bioscience Biotechnology And Biochemistry*, 78(12), 2081–2088. doi:10.1080/09168451.2014.946392
- Kim, M., Eo, H., Lim, J. G., Lim, H. & Lim, Y. (2022). Can Low-Dose of Dietary Vitamin E Supplementation Reduce Exercise-Induced Muscle Damage and Oxidative Stress? A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients*, 14(8), 1599. doi:10.3390/nu14081599
- Kyriakidou, Y., Wood, C., Ferrier, C., Dolci, A. & Elliott, B. (2021). The effect of Omega-3 polyunsaturated fatty acid supplementation on exercise-induced muscle damage. *Journal Of The International Society Of Sports Nutrition*, 18(1). doi:10.1186/s12970-020-00405-1

- Lamprecht, M., Holasek, S., Konrad, M., Seebauer, W. & Hiller-Baumgartner, D. (2017). *Lehrbuch der Sporternährung* (1. Aufl.). Weinitzen: CLAX Fachverlag.
- Lee, S., Choi, Y., Jeong, E., Park, J., Kim, J., Tanaka, M. & Choi, J. (2023). Physiological significance of elevated levels of lactate by exercise training in the brain and body. *Journal Of Bioscience And Bioengineering*, 135(3), 167–175. doi: 10.1016/j.jbiosc.2022.12.001
- Leitzmann, C. & Keller, M. (2013). *Vegetarische Ernährung*. (3. Aufl.). Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Leitzmann, C. & Keller, M. (2020). *Vegetarische und vegane Ernährung* (4. Aufl.). Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Lewis, N. A., Daniels, D., Calder, P. C., Castell, L. M. & Pedlar, C. R. (2020). Are There Benefits from the Use of Fish Oil Supplements in Athletes? A Systematic Review. *Advances in Nutrition*, 11(5), 1300–1314. doi:10.1093/advances/nmaa050
- Liu, T., Sun, L., Zhang, Y., Wang, Y. & Zheng, J. (2021). Imbalanced GSH/ROS and sequential cell death. *Journal Of Biochemical And Molecular Toxicology*, 36(1). doi:10.1002/jbt.22942
- Macartney, M. J., Hingley, L., Brown, M. A., Peoples, G. E. & McLennan, P. L. (2014). Intrinsic heart rate recovery after dynamic exercise is improved with an increased omega-3 index in healthy males. *British Journal Of Nutrition*, 112(12), 1984–1992. doi:[10.1017/s0007114514003146](https://doi.org/10.1017/s0007114514003146)
- McLeish, M. J. & Kenyon, G. L. (2005). Relating Structure to Mechanism in Creatine Kinase. *Critical Reviews in Biochemistry And Molecular Biology*, 40(1), 1–20. doi:10.1080/10409230590918577
- Mickleborough, T. D. (2013). Omega-3 polyunsaturated fatty acids in physical performance optimization. *International Journal Of Sport Nutrition And Exercise Metabolism*, 23(1), 83–96. doi:10.1123/ijsnem.23.1.83
- Moghadam-Kia, S., Oddis, C. V. & Aggarwal, R. (2016). Approach to asymptomatic creatine kinase elevation. *Cleveland Clinic Journal Of Medicine*, 83(1), 37–42. doi:10.3949/ccjm.83a.14120
- Morishima, T., Tsuchiya, Y., Ueda, H. & Ochi, E. (2020). Muscular endurance and muscle metabolic responses to 8 weeks of omega-3 polyunsaturated fatty acids supplementation. *Physiological Reports*, 8(16). doi:10.14814/phy2.14546
- Nieman, D. C., Henson, D. A., McAnulty, S. R., Jin, F. & Maxwell, K. R. (2009). n-3 Polyunsaturated Fatty Acids Do Not Alter Immune and Inflammation Measures in Endurance Athletes. *International Journal Of Sport Nutrition And Exercise Metabolism*, 19(5), 536–546. doi:10.1123/ijsnem.19.5.536
- Nosaka, N., Suzuki, Y., Suemitsu, H., Kasai, M., Kato, K. & Taguchi, M. (2018). Medium-chain Triglycerides with Maltodextrin Increase Fat Oxidation during Moderate-intensity Exercise and Extend the Duration of Subsequent High-intensity Exercise. *Journal Of Oleo Science*, 67(11), 1455–1462. doi:10.5650/jos.ess18112

- Ochi, E., Yanagimoto, K., Morishima, T. & Tsuchiya, Y. (2018). Eicosapentaenoic Acid-Rich Fish Oil Supplementation Inhibits the Decrease in Concentric Work Output and Muscle Swelling of the Elbow Flexors. *Journal Of The American College Of Nutrition*, 38(2), 125–131. doi:10.1080/07315724.2018.1470042
- Okereke, O. I., Vyas, C. M., Mischoulon, D., Chang, G., Cook, N. R., Weinberg, A., Bubes, V., Copeland, T., Friedenberg, G., Lee, I., Buring, J. E., Reynolds, C. F. & Manson, J. E. (2021). Effect of Long-term Supplementation With Marine Omega-3 Fatty Acids vs Placebo on Risk of Depression or Clinically Relevant Depressive Symptoms and on Change in Mood Scores. *JAMA*, 326(23), 2385. doi:10.1001/jama.2021.21187
- Parletta, N., Zarnowiecki, D., Cho, J., Wilson, A., Bogomolova, S., Villani, A., Itsiopoulos, C., Niyonsenga, T., Blunden, S., Meyer, B., Segal, L., Baune, B. T. & O'Dea, K. (2017). A Mediterranean-style dietary intervention supplemented with fish oil improves diet quality and mental health in people with depression: A randomized controlled trial (HELFIMED). *Nutritional Neuroscience*, 22(7), 474–487. doi:10.1080/1028415x.2017.1411320
- Pedersen, B. K., Åkerström, T. C. A., Nielsen, A. R. & Fischer, C. P. (2007). Role of myokines in exercise and metabolism. *Journal Of Applied Physiology*, 103(3), 1093–1098. doi:10.1152/jappphysiol.00080.2007
- Pei, J., Pan, X., Wei, G. & Hua, Y. (2023). Research progress of glutathione peroxidase family (GPX) in redoxitation. *Frontiers in Pharmacology*, 14. doi: 10.3389/fphar.2023.1147414
- Peoples, G. E., McLennan, P. L., Howe, P. R. C. & Groeller, H. (2008). Fish Oil Reduces Heart Rate and Oxygen Consumption During Exercise. *Journal Of Cardiovascular Pharmacology*, 52(6), 540–547. doi:10.1097/fjc.0b013e3181911913
- Prolo, P., Wong, M. & Licinio, J. (1998). Leptin. *The International Journal Of Biochemistry & Cell Biology*, 30(12), 1285–1290. doi:10.1016/s1357-2725(98)00094-6
- Ramos-Campo, D. J., Ávila-Gandía, V., López-Román, F. J., Miñarro, J., Contreras, C., Soto-Méndez, F., Pedrol, J. C. D. & Luque-Rubia, A. J. (2020). Supplementation of Re-Esterified Docosahexaenoic and Eicosapentaenoic Acids Reduce Inflammatory and Muscle Damage Markers after Exercise in Endurance Athletes: A Randomized, Controlled Crossover Trial. *Nutrients*, 12(3), 719. doi:10.3390/nu12030719
- Raschka, C. & Ruf, S. (2022). *Ernährung und Sport* (5. Aufl.). Stuttgart: Thieme.
- Rodriguez, D., Lavie, C. J., Elagizi, A. & Milani, R. V. (2022). Update on Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids on Cardiovascular Health. *Nutrients*, 14(23), 5146. doi:10.3390/nu14235146
- Rogers, D. L., Tanaka, M. J., Cosgarea, A. J., Ginsburg, R. D. & Dreher, G. M. (2023). How Mental Health Affects Injury Risk and Outcomes in Athletes. *Sports Health A Multidisciplinary Approach*, 16(2), 222–229. doi:10.1177/19417381231179678

- Rosa, A. C., Corsi, D., Cavi, N., Bruni, N. & Dosio, F. (2021). Superoxide Dismutase Administration: A Review of Proposed Human Uses. *Molecules*, 26(7), 1844. doi:10.3390/molecules26071844
- Rueggsegger, G. N. & Booth, F. W. (2017). Health Benefits of Exercise. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 8(7), a029694. doi:10.1101/cshperspect.a029694
- Sabour, H., Javidan, A. N., Latifi, S., Shidfar, F., Heshmat, R., Razavi, S. E., Vafa, M. R. & Larijani, B. (2014). Omega-3 fatty acids' effect on leptin and adiponectin concentrations in patients with spinal cord injury: A double-blinded randomized clinical trial. *Journal Of Spinal Cord Medicine*, 38(5), 599–606. doi:[10.1179/2045772314y.0000000251](https://doi.org/10.1179/2045772314y.0000000251)
- Savitz, J. (2019). The kynurenine pathway: a finger in every pie. *Molecular Psychiatry*, 25(1), 131–147. doi:10.1038/s41380-019-0414-4
- Schek, A., Braun, H., Carlsohn, A., Großhauser, M., König, D., Lampen, A., Mosler, S., Nieß, A., Oberritter, H., Schäbenthal, K., Stehle, P., Virmani, K., Ziegenhagen, R. & Hesecker, H. (2019). Fette in der Sporternährung [Peer Review]. *Ernaehrungs Umschau International*, 66(9), 181–188. doi:10.4455/eu.2019.042
- Schlittler, M., Goiny, M., Agudelo, L. Z., Venckunas, T., Brazaitis, M., Skurvydas, A., Kamandulis, S., Ruas, J. L., Erhardt, S., Westerblad, H. & Andersson, D. C. (2016). Endurance exercise increases skeletal muscle kynurenine aminotransferases and plasma kynurenic acid in humans. *AJP Cell Physiology*, 310(10), C836–C840. doi:[10.1152/ajpcell.00053.2016](https://doi.org/10.1152/ajpcell.00053.2016)
- Schnohr, P., O'Keefe, J. H., Marott, J. L., Lange, P. & Jensen, G. B. (2015). Dose of Jogging and Long-Term Mortality. *Journal Of The American College Of Cardiology*, 65(5), 411–419. doi:[10.1016/j.jacc.2014.11.023](https://doi.org/10.1016/j.jacc.2014.11.023)
- Sedano, S., Marín, P. J., Cuadrado, G. & Redondo, J. C. (2013). Concurrent training in elite male runners. *The Journal Of Strength And Conditioning Research*, 27(9), 2433–2443. doi:10.1519/jsc.0b013e318280cc26
- Sepidarkish, M., Akbari-Fakhrabadi, M., Daneshzad, E., Yavari, M., Rezaeinejad, M., Morvaridzadeh, M. & Heshmati, J. (2020). Effect of omega-3 fatty acid plus vitamin E Co-Supplementation on oxidative stress parameters: A systematic review and meta-analysis. *Clinical Nutrition*, 39(4), 1019–1025. doi:10.1016/j.clnu.2019.05.004
- Shahidi, F. & Ambigaipalan, P. (2018). Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids and Their Health Benefits. *Annual Review Of Food Science And Technology*, 9(1), 345–381. doi:10.1146/annurev-food-111317-095850
- Shiroma, E. J. & Lee, I. (2010). Physical Activity and Cardiovascular Health. *Circulation*, 122(7), 743–752. doi:10.1161/circulationaha.109.914721
- Smith, G. I., Julliand, S., Reeds, D. N., Sinacore, D. R., Klein, S. & Mittendorfer, B. (2015). Fish oil-derived n-3 PUFA therapy increases muscle mass and function in healthy older

- adults. *American Journal Of Clinical Nutrition*, 102(1), 115–122. doi: 10.3945/ajcn.114.105833
- Sproston, N. R. & Ashworth, J. J. (2018). Role of C-Reactive Protein at Sites of Inflammation and Infection. *Frontiers in Immunology*, 9. doi:10.3389/fimmu.2018.00754
- Thielecke, F. & Blannin, A. (2020). Omega-3 Fatty Acids for Sport Performance—Are They Equally Beneficial for Athletes and Amateurs? A Narrative Review. *Nutrients*, 12(12), 3712. doi:10.3390/nu12123712
- Thompson, P. D., Crouse, S. F., Goodpaster, B., Kelley, D., Moyna, N. & Pescatello, L. (2001). The acute versus the chronic response to exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(Supplement), S438–S445. doi: 10.1097/00005768-200106001-00012
- Tinsley, G. M., Gann, J. J., Huber, S. R., Andre, T. L., La Bounty, P. M., Bowden, R. G., Gordon, P. M. & Grandjean, P. W. (2016). Effects of Fish Oil Supplementation on Postresistance Exercise Muscle Soreness. *Journal Of Dietary Supplements*, 14(1), 89–100. doi: 10.1080/19390211.2016.1205701
- Tomczyk, M., Bidzan-Wiącek, M., Kortas, J. A., Kochanowicz, M., Jost, Z., Fisk, H. L., Calder, P. C. & Antosiewicz, J. (2024). Omega-3 fatty acid supplementation affects tryptophan metabolism during a 12-week endurance training in amateur runners: a randomized controlled trial. *Scientific Reports*, 14(1). doi:10.1038/s41598-024-54112-x
- Tomczyk, M., Jost, Z., Chroboczek, M., Urbański, R., Calder, P. C., Fisk, H. L., Sprengel, M. & Antosiewicz, J. (2022). Effects of 12 Wk of Omega-3 Fatty Acid Supplementation in Long-Distance Runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 55(2), 216–224. doi:10.1249/mss.0000000000003038
- Torres-Mendoza, B. M. G., Ortiz, G. G., Sánchez-Romero, L., Delgado-Lara, D. L. C., Martínez, M. T. G., Mireles-Ramírez, M.-A., Serrano, J. A. C. & Moisés, F. P. P. (2022). Dietary fish oil increases catalase activity in patients with probable Alzheimer's disease. *Nutrición Hospitalaria*, 39(6), 1364–1368. doi:[10.20960/nh.04153](https://doi.org/10.20960/nh.04153)
- Tsuji, K., Tsuchiya, Y., Yokoi, K., Yanagimoto, K., Ueda, H. & Ochi, E. (2023). Eicosapentaenoic Acid and Medium-Chain Triacylglycerol Structured Lipids Improve Endurance Performance. *Nutrients*, 15(17), 3692. doi:10.3390/nu15173692
- Vahdat-Lasemi, F., Aghaee-Bakhtiari, S. H., Tasbandi, A., Jaafari, M. R. & Sahebkar, A. (2021). Targeting interleukin- β by plant-derived natural products: Implications for the treatment of atherosclerotic cardiovascular disease. *Phytotherapy Research*, 35(10), 5596–5622. doi: 10.1002/ptr.7194
- Valk, N. & Hornstra, G. (2000). Relationship Between Vitamin E Requirement and Polyunsaturated Fatty Acid Intake in Man: a Review. *International Journal For Vitamin And Nutrition Research*, 70(2), 31–42. doi:10.1024/0300-9831.70.2.31

- Wall, R., Ross, R. P., Fitzgerald, G. F. & Stanton, C. (2010). Fatty acids from fish: The anti-inflammatory potential of long-chain omega-3 fatty acids. *Nutrition Reviews*, Volume 68(Issue 5), 280–289. doi:[10.1111/j.1753-4887.2010.00287.x](https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00287.x)
- Xin, G. & Eshaghi, H. (2021). Effect of omega-3 fatty acids supplementation on indirect blood markers of exercise-induced muscle damage: Systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Food Science & Nutrition*, 9(11), 6429–6442. doi:10.1002/fsn3.2598
- Xu, Y., Liang, M., Ugbolue, U. C., Fekete, G. & Gu, Y. (2022). Effect of Physical Exercise Under Different Intensity and Antioxidative Supplementation for Plasma Superoxide Dismutase in Healthy Adults: Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Frontiers in Physiology*, 13. doi:10.3389/fphys.2022.707176
- Żebrowska, A., Hall, B., Stolecka-Warzecha, A., Stanula, A. & Sadowska-Krępa, E. (2021). The effect of omega-3 fatty acid supplementation on serum adipocytokines, lipid profile and biochemical markers of inflammation in recreational runners. *Nutrients*, 13(2). doi:10.3390/nu13020456
- Zhang, X., Ritonja, J. A., Zhou, N., Chen, B. E. & Li, X. (2022). Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids Intake and Blood Pressure: A Dose-Response Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal Of The American Heart Association*, 11(11). doi:[10.1161/jaha.121.025071](https://doi.org/10.1161/jaha.121.025071)

9 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig 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.

Datum:



Unterschrift:

