



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

„High Carb und Low Carb Ernährungsformen im
Ausdauersport“

verfasst von / submitted by
Denis Kegl, Bakk. rer. nat.

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Science (MSc)

Wien, 09.2022

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Master Sportwissenschaften

Betreut von / Supervisor:

Dr. Christoph Triska, BSc MSc

Zusammenfassung

Für lang andauernde Ausdauersportarten, wie etwa Triathlon, (Ultra-)Marathon, Rennradfahren und Mountainbiking ist die optimale Ernährung für die Leistungsfähigkeit des/der Sportlers*in von Bedeutung. Eine an den Sport angepasste Ernährungsform und ein Ernährungsplan sind die Voraussetzung für ein hohes Leistungsniveau. Es existieren Hinweise auf die Vorteile von Low Carb Diäten (LC), aber auch High Carb (HC) Diäten haben ihre Daseinsberechtigung. Beide Ernährungsformen bringen gewisse metabolische Veränderungen mit sich, die die Ausdauerleistungsfähigkeit beeinflussen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Unterschiede von der High Carb Low Fat (HCLF) und Low Carb High Fat (LCHF) Ernährung, auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu präsentieren und einzuordnen. Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt.

Die Studien für dieses Review wurden in den Literaturdatenbanken „Pub Med“ und „Web of Science“ gesucht und bei Erfüllung der Einschlusskriterien in diese Arbeit eingeschlossen. Voraussetzung für die Studiaauswahl war, dass die Proband*innen zwischen 18-65 Jahren alt sind, einen Ausdauersport betreiben und im Interventionszeitraum sich entweder High Carb, Medium Carb oder Low Carb ernähren. In Summe ergab die Suche zehn geeignete Studien, die in dieses Review aufgenommen wurden.

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Vor- und Nachteile der LC und HC Ernährung herauszuarbeiten. Ausdauersportler*innen, die sich LC ernähren, profitieren von einer Reduktion der Körpermasse und Körperfettmasse. Außerdem zeigte die Untersuchung eine höhere Fettoxdationsrate der LC Athlet*innen. Wohingegen die HC Sportler*innen von einer Verbesserung der Zeit bis zu Erschöpfung und im Zeitfahren profitieren. Nachteile ergeben sich bei der LC Ernährungsform im Hinblick auf hochintensive Ausdauerbelastungen. Nachteile der HC Ernährung liegen bei Wettkämpfen vor, welche geringe Belastungsintensitäten aufweisen und über längere Distanzen gehen. Gesamt betrachtet ist zu erwähnen, dass beide Ernährungsformen hilfreich sein können, um die Leistung im Ausdauersport zu verbessern.

Abstract

Optimal nutrition is one of the key elements of success for athletes of long endurance sports, such as triathlon, marathon, road cycling, mountainbiking and ultramarathon. A diet and nutrition plan adapted to the respective sport is a requirement for a high level performance. Evidence shows benefits of both low carb (LC) and high carb (HC) diets. Both diets bring certain metabolic changes that affect endurance performance.

The aim of this study is to present and classify the differences and benefits of high carb low fat (HCLF) and low carb high fat diets (LCHF) on endurance performance. To answer the research question, a systematic literature review was conducted.

The studies for this review were searched in the literature databases “Pub Med” and “Web of Science”. The prerequisite for the study selection was that the subjects were between 18-65 years old, practiced an endurance sport and consumed either high carb, medium carb or low carb during the intervention period. In total, the search yielded ten studies that were included in this review.

The results of the literature review show that athletes on LC diets benefit from a reduction in body mass and body fat mass. In addition, the study showed a higher fat oxidation rate of the LC athletes. The athletes following HC diet benefit from an improvement in time to exhaustion and in time trials. In relation to the LC diet there is a disadvantage regarding high-intensity endurance exercise. Disadvantages of the HC diet are present in competitions, which have low intensities and go over longer distances. Overall, both types of nutrition can be helpful to improve performance in endurance sports

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	I
Abstract	II
Vorwort	V
Einleitung	1
1 Theoretische Grundlagen	2
1.1 Energiebereitstellung	2
1.1.1 Aerobe und Anaerobe Energiebereitstellung	3
1.1.2 Glykolyse	3
1.1.3 Zitratzyklus.....	4
1.2 Makronährstoffe	5
1.2.1 Bedeutung der Kohlenhydrate.....	5
1.2.2 Bedeutung der Fette	6
1.2.3 Bedeutung der Eiweiße	7
1.3 Energieaufnahme/Energiebedarf	7
1.4 Körpereigene Fett- und Kohlenhydratdepots	7
1.5 Ernährung im Sport	8
1.5.1 Ernährungsformen.....	8
1.5.2 Low Carb und High Fat Diätformen	8
1.5.3 Ketogene Diät.....	9
1.5.4 Supplementation und Auswirkungen von Ketonkörpern	10
1.5.5 High Carb und Low Fat Diät.....	10
1.5.6 Paleo Diät	11
1.5.7 Nährstoffverteilung im Ausdauersport.....	11
1.5.8 Aktuelle Empfehlungen in der Sporternährung	12
1.6 Ausdauer und Ausdauersport.....	13
1.6.1 Running Economy	16
1.6.2 Maximale Sauerstoffaufnahme	16
2 Forschungsstand.....	18
2.1 Problemstellung	19
2.2 Forschungsfrage und Zielsetzung.....	21
3 Methodisches Vorgehen.....	22
3.1 Auswahl der Studien.....	22
3.2 Auswahlkriterien	22
3.3 Suchstrategien.....	24
4 Ergebnisse	25

4.1	Prisma Chart / Flow Diagram.....	25
4.2	PEDro-Skala	26
4.3	Skalenkriterien.....	26
4.4	Übersichtstabelle	27
4.5	Studienübersicht	28
4.6	Analyse der Studien.....	32
4.6.1	Ernährungsintervention	32
4.6.2	Eingangs- und Abschlusstestungen.....	32
4.6.3	Interventionsprogramme	34
4.6.4	Analyse der Low Carb Studien	35
4.6.5	Analyse der Medium Carb und High Carb Studien	36
4.7	Studienergebnisse	37
4.7.1	Ergebnisse der Low Carb Studien.....	37
4.7.2	Ergebnisse der High Carb Studien	37
5	Diskussion.....	39
5.1	Interpretation der Ergebnisse.....	40
5.2	Limitationen.....	43
5.3	Fazit	44
	Literaturverzeichnis.....	45
	Abbildungsverzeichnis	56
	Tabellenverzeichnis.....	57

Vorwort

Endlich...

Lange habe ich darauf gewartet dieses Wort, bezüglich meiner Masterarbeit, aussprechen zu können. Der Weg bis hier her war nicht leicht, denn es gab ein paar Hürden, die mit freundlicher Unterstützung meiner Familie, Freundin und Freunde gemeistert wurden. Deshalb gilt der Dank besonders den Personen, die mich in dieser Zeit ertragen und unterstützen mussten.

Zu guter Letzt gilt ein besonderer Dank Herrn Dr. Christoph Triska, BSc MSc, der sich die Zeit nahm, um mir einzelne Schritte hinsichtlich meiner Masterarbeit zu erklären. Danke für Ihr Vertrauen und dass ich mir so ein interessantes Thema auswählen durfte, welches vor allem für mich viele neue Erkenntnisse lieferte.

Einleitung

Die Ernährung spielt im Breitensport und Spitzensport eine wesentliche Rolle und ist ein Faktor, der stets an Bedeutung zunimmt, vor allem im Anbetracht der Leistungsfähigkeit und steigenden Belastungen speziell im Leistungssport (Raschka & Ruf, 2012). Die Ernährungsstrategien, Meinungen und Konzepte hinsichtlich Nahrung im Ausdauersport unterscheiden sich wesentlich. In dieser Masterarbeit werden die Vor- und Nachteile der High Carb und der Low Carb Ernährung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit bei Ausdauersportler*innen untersucht. Um ein besseres Verständnis über Ausdauer bzw. Ausdauersport und Ernährung zu entwickeln, bedarf es der Begriffsdefinition einzelner Elemente bzw. die Vorstellung der theoretischen Grundlagen. In der Einleitung wird ein allgemeiner Überblick über die Thematik geschaffen, danach folgt eine genauere Erläuterung der Themen, die für diese Arbeit, relevant sind.

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Energiebereitstellung

Bei den aeroben Organismen wird die Energiegewinnung in drei Stufen eingeteilt. In der ersten Stufe erfolgt die Zerlegung der großen Moleküle in Aminosäuren, Zucker und Fettsäuren. Im nächsten Schritt werden die kleinen Moleküle, also Aminosäuren, Zucker und Fettsäuren, in Acetyl-CoA abgebaut. Die letzte Phase beinhaltet den Zitratzyklus und die oxidative Phosphorylierung, hier werden die Nahrungsstoffe zu CO_2 oxidiert (Berg et al., 2018). Im folgenden Absatz wird näher auf die Thematik eingegangen.

Zu den lebensnotwendigen Prozessen gehören unter anderem Fortbewegung, Verdauung von Nahrung und Abwehr von Fremdstoffen. Die für diese Abläufe benötigte Energie wird mithilfe von Nahrung erzeugt, die nach einem chemischen Stoffwechselprozess in Form von Adenosintriphosphat (ATP) für den Körper verwertbar gemacht wird. Die Energiesubstrate, Grundlage für diesen Prozess, sind Kohlenhydrate (KH), Fette und Eiweiße. Hauptsächlich werden KH und Fette zu ATP verstoffwechselt. Ein Mol Glukose (Traubenzucker), eine Art der KH, ergibt bei vollständigem oxidativen Abbau in den Mitochondrien 38 ATP. Hingegen ergibt sich bei der Oxidation aus einem Mol Palmitinsäure, eine Art der Fettsäuren, welche 16 Kohlenstoff-Atome besitzt, 129 ATP (Müller-Esterl, 2018). Durch die ATP-Spaltung entsteht Adenosindiphosphat und Phosphorsäure, die dem Körper als Energie zur Verfügung stehen. Nur eine geringe Menge ATP kann in Zellen gespeichert werden und ist nach einer intensiven Belastung von zwei bis drei Sekunden aufgebraucht, danach wird Kreatinphosphat (CrP) als Energiesubstrat herangezogen. Das CrP ist ebenfalls nach einer kurzen intensiven Belastung, wie z.B. nach einem Sprint, aufgebraucht. Die Kreatinphosphatspeicher haben die Eigenschaft, sich nach der Belastung schnell wieder zu füllen. Kommt es zu einer erneuten intensiven Belastung, mit einem leeren CrP- Speicher, kann die Muskulatur nicht kontrahiert werden. Diese Prozesse kommen ohne Sauerstoff aus und werden als anaerobe Energiebereitstellungswege oder anaerob-alkalisch bezeichnet. Für längere Distanzen beim Radfahren, Laufen und Schwimmen benötigt der menschliche Körper Glucose, welche aus Kohlenhydraten gewonnen wird. Dabei werden vom Körper gespeicherte und durch die Nahrung aufgenommene Kohlenhydrate verwendet. Diese gespeicherten KH-Depots sind begrenzt, werden diese aufgebraucht, wird auf die Oxidation von Fetten zurückgegriffen und die Belastung muss reduziert werden (Lamprecht et al., 2017) Diese Energiegewinnung wird

auch anaerobe Glykolyse oder anaerob-laktazid genannt und nimmt mit der Dauer der Belastung zu, so auch die Laktatkonzentration (Schnabel et al., 2016).

1.1.1 Aerobe und Anaerobe Energiebereitstellung

Unter dem Begriff aerob werden die Stoffwechselprozesse verstanden, die mit Sauerstoff ablaufen und in den Mitochondrien stattfinden. Außerhalb der Mitochondrien, im Zytoplasma, findet der anaerobe Stoffwechselprozess statt. Entsteht im anaeroben Metabolismus vermehrt Laktat, wird von einer laktaziden Energiebereitstellung gesprochen (Zintl & Eisenhut, 2013)

1.1.2 Glykolyse

Glykolyse wird von den griechischen Wörtern „glykos“ und „lysis“ abgeleitet, welche übersetzt auf Deutsch „süß“ und „Auflösung“ bedeuten (Berg et al., 2018). Die Glykolyse im Zytoplasma der Zellen ist ein energiegewinnender Prozess, bei dem Glucose abgebaut wird. Der erste Schritt in diesem Vorgang ist es, die gespeicherte Glucose im Körper, welche sich in der Leber und der Muskulatur befindet, in Glucosemoleküle aufzuspalten. Dabei werden zwei Varianten des energiegewinnenden Prozesses unterschieden, die ohne und mit Sauerstoff ablaufen, also anaerob und aerob. Bei der anaeroben Glykolyse entstehen aus einem Glucosemolekül zwei Moleküle ATP und Pyruvat, das in drei Stoffwechselvorgängen abgebaut wird. Bei dem ersten Vorgang wird das entstandene Pyruvat nach der Abspaltung zu Acetyl-CoA und in weiterer Folge zu CO₂ oder H₂O abgebaut. Des Weiteren ist es möglich, dass das vorhandene Pyruvat zur Oxalacetat abgebaut wird. Bei hochintensiven Belastungen und nicht genügend Sauerstoff steigt die Pyruvatkonzentration an und kann nicht mehr oxidativ im Zitratzyklus verarbeitet werden. Die Folge ist die Umwandlung von Pyruvat in Laktat (Milchsäure), welche den letzten Pyruvat - Abbau beschreibt (Tomasits & Haber, 2016).

Ist jedoch genügend Sauerstoff vorhanden findet der oxidative Glykogenabbau, bei geringer glykolytischer Flussrate statt. Dabei wird bei vollständigem oxidativen Abbau aus einem Mol Glukose 38 ATP gewonnen. Aus einem Mol Fettsäure werden 130 ATP gewonnen. Ebenfalls können auch Proteine verstoffwechselt werden. Der Prozess der aeroben Glykolyse und anaeroben Glykolyse verläuft bis zum Pyruvat gleich. Bei der aeroben Glykolyse erfolgt die oxidative Decarboxylierung von Pyruvat zu Acetyl-CoA und den Transport in die Mitochondrien. Der Abbau von Fett- und Aminosäuren führt ebenfalls zu der Bildung von Acetyl-CoA. Dieser Prozess findet unter geringer glykolitischer Energieflussrate und genügend Sauerstoff statt. In weiterer Folge wird das Acetyl-CoA infiltriert und verbindet sich mit der

Oxalsäure zur Zitronensäure (Zintl & Eisenhut, 2013) In der Abbildung 1, wird der Prozess der Glykolyse grob dargestellt.

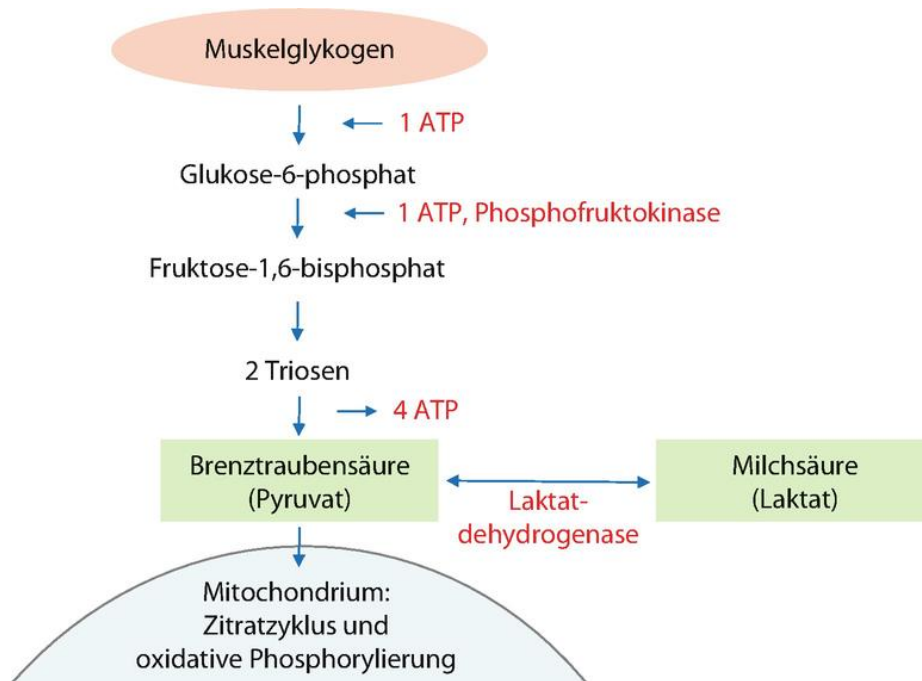


Abbildung 1: Grobdarstellung der Glykolyse ausgehend vom Muskelglykogen bis zur Gleichgewichtsreaktion der Laktatdehydrogenase (Ferrauti, 2020)

1.1.3 Zitratzyklus

Nach dem Prozess der anaeroben Glykolyse findet der Zitratzyklus in den Mitochondrien statt. Der Zitratzyklus auch Zitronensäurezyklus oder Tricarbonsäurezyklus genannt, beschreibt einen biochemischen Stoffwechselweg, bei dem Energie gewonnen wird. Die Aufgabe des Zitratzyklus ist die Umwandlung von Acetyl-CoA in CO_2 . Die dabei entstandene Energie, in Form von $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 , wird intrazellulär gespeichert. Danach treten diese Brennstoffmoleküle als Acetyl-Coenzym A in den Zyklus ein (Berg et al., 2018).

Nach den Vorgängen der Glykolyse, Pyruvatoxidation und dem Zitratzyklus geschieht der letzte Prozess der Zellatmung. Dieser ist Teil des aeroben Energiestoffwechsels, wird Atmungskette genannt und findet bei Eukaryoten und Prokaryoten in der Plasmamembran statt. Die wesentliche Aufgabe der Atmungskette ist es nun, die Reduktionsmittel $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 zu oxidieren und die daraus entstandene Energie für die Synthese des Energieträgers ATP und ADP zu nutzen. Dieser Vorgang wird auch oxidative Phosphorylierung genannt (Rassow et al., 2022).

1.2 Makronährstoffe

Die Grundnährstoffe werden in Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße unterteilt und unterscheiden sich in ihrem Energiegehalt pro Gramm Nährstoff. Wie in Tabelle 1 zu entnehmen ist, weisen Fette mit 9.3 kcal pro Gramm den größten Energiegehalt auf. Das kalorische Äquivalent, also die Energieproduktion pro Liter Sauerstoff, bestimmt bei hoher Belastung, welcher der Makronährstoffe verstoffwechselt wird. Der Grund dafür ist die verschieden hohe Sauerstoffmenge, die für die Oxidation der Nährstoffe benötigt wird und begrenzt verfügbar ist. Das höchste kalorische Äquivalent liefern KH, welche vorzugsweise bei hohen Intensitäten verstoffwechselt werden. Ist genügend Sauerstoff verfügbar und die Intensität der Belastung niedrig, werden Fette metabolisiert (Müller et al., 2015).

Tabelle 1: Physiologischer Brennwert und kalorisches Äquivalent der Grundnährstoffe (Ferrauti, 2020)

Nährstoff	Physiologischer Brennwert	Kalorisches Äquivalent
Fette	9,3 kcal/g	4,65 kcal/l O ₂
Kohlenhydrate	4,1 kcal/g	5,05 kcal/l O ₂
Proteine	4,1 kcal/g	4,48 kcal/l O ₂

1.2.1 Bedeutung der Kohlenhydrate

Die Klassifikation der Kohlenhydrate erfolgt in Monosaccharide (Einfachzucker), Disaccharide (Zweifachzucker), Oligosaccharide (Mehrfachzucker) und Polysaccharide (Vielfachzucker). Monosaccharide werden in Glukose (Traubenzucker) z.B. in Honig, Fruktose (Fruchtzucker) z.B. in Bananen und Galaktose (Schleimzucker) z.B. in Süßwaren eingeteilt. Der Zweifachzucker wird in Maltose (Malzzucker), Saccharose (Rohrzucker) und Laktose (Milchzucker) unterteilt. Diese Inhaltsstoffe sind unter anderem in Zucker, Marmeladen, Limonaden und Malzbier zu finden. Vielfachzucker beinhalten entweder Amylose/Amylopektin (pflanzliche Stärke) oder Glykogen (tierische Stärke). Diese sind unter anderem in Getreide, Brot, Reis oder Kartoffeln zu finden. Umso kürzer die Kettenlänge des KH ist, desto schneller wird es resorbiert und desto höher ist der Glykämische Index (Ferrauti, 2020).

Der primäre Makronährstoff bei hohen Belastungen sind KH. Durch deren hohen Sauerstoffanteil liefern sie mehr Energie bei ihrer Verbrennung als Fett. Bei niedrigeren Trainingsintensitäten werden Fette als Energiequelle genutzt, da entweder die KH-Reserven entleert sind oder die KH-Depots geschützt werden. Dennoch leisten auch bei niedrigen Intensitäten die KH einen Beitrag zu effektiven Energiegewinnung. Die durch den Abbau entstandenen Nebenprodukte der KH, ermöglichen den vollständigen Abbau der Fettsäuren. Sind nicht genügend KH vorhanden, können die Fettsäuren nicht vollständig verstoffwechselt werden. Die Folge dieses Prozesses ist die Übersäuerung der Muskulatur und Ketose. Weiteres schützen KH den Aminosäurepool, auf welchen der Körper zugreifen würde, wenn nicht genügend KH vorhanden wären (Reiche & Müller, 2014). Um höhere Belastungsintensitäten mit 70-75% der $\dot{V}O_{2max}$ aufrechtzuhalten, benötigt der Organismus vorwiegend KH. Werden die KH-Reserven während der Belastung aufgebraucht, wird die Oxidation aus Fetten als Energiequelle genutzt. Die Belastungsintensität muss dann reduziert werden, da die Energieflussrate aus Triglyceriden geringer ist, als die aus KH. Volle Kohlenhydratspeicher und Zufuhr von KH in jeglicher Form fördern die Leistung bei intensiven Wettkämpfen oder Trainingsinterventionen (Lamprecht et al., 2017).

1.2.2 Bedeutung der Fette

Wird dem Organismus zu wenig Energie zugeführt, kommt es zum Abbau von Triglyceriden, auch Lipolyse genannt. Dieser Vorgang erfolgt in drei Teilschritten. Durch das Zusammenspiel von β -Oxidation, Citratzyklus und Atmungskette wird nutzbare Energie in Form von ATP gewonnen (Lamprecht et al., 2017).

Ausdauerathlet*innen sind in der Lage bei niedrigen Intensitäten von 60% der $\dot{V}O_{2max}$ ihren Energiebedarf zu 70-90% aus dem Fettstoffwechsel zu decken. Auch bei höheren Intensitäten ist es möglich, den Großteil des Energiebedarfs aus Fetten zu gewinnen, jedoch muss eine gut ausgebildete Grundlagenausdauer der sporttreibenden Person vorliegen. (Konopka, 2018). Aufgeteilt wird der Makronährstoff Fett in drei Gruppen: gesättigte Fettsäuren, einfach ungesättigte Fettsäuren und mehrfach ungesättigte Fettsäuren. Die zuletzt genannte Gruppe wird in Omega-6-Fettsäuren und Omega-3-Fettsäuren unterteilt (Feil et al., 2011).

1.2.3 Bedeutung der Eiweiße

Eiweiße bestehen aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel. Die letzteren beiden chemischen Verbindungen sind in KH und Fetten nicht vorhanden. Der Organismus ist auf Schwefel angewiesen und erhält diesen nur aus Eiweißen. Die regelmäßige Zufuhr von Eiweißen ist essentiell. Eiweiße haben hingegen keine wesentliche Rolle als energieliefernder Nährstoff und werden nur in Ausnahmensituationen als Energiequelle herangezogen (Pauli & Girreßer, 2014).

1.3 Energieaufnahme/Energiebedarf

Je nach Belastungsintensität ist das Verhältnis von Kohlenhydraten und Fetten in der Nahrung, der Ausdauerathlet*innen an den Energiebedarf, anzupassen. Dieser wird von mehreren Faktoren wie Körpergewicht, Körpergröße, Trainingsinhalte und Trainingsintensität beeinflusst. Ein bedeutender Aspekt in Bezug auf den Energiebedarf ist die körperliche Aktivität. Der Energiebedarf kann bei Wettkämpfen wie bei der Tour de France oder Race Across America mehr als 10.000 kcal pro Tag betragen (Braun et al., 2020). Demgegenüber existieren generell auch weniger intensive Belastungsphasen wie Vorbereitungs-, Erholungsphasen oder Trainingsinterventionen, bei denen der Energiebedarf relativ niedrig ist (Mosler, 2016). Es gibt mehrere Methoden, um den Energieumsatz eines Organismus zu messen. Eine davon ist die indirekte Kalorimetrie. Dabei wird die Sauerstoffaufnahme (VO_2) und Kohlendioxidabgabe (VCO_2) in Liter pro Minute gemessen (Braun et al., 2020). Bei dieser Methode ist es möglich, die Kohlenhydrat- bzw. Fettverstoffwechselung spiroergometrisch abzuschätzen. Hauptsächlich wird mit diesem Verfahren die Ausdauerleistungsfähigkeit festgestellt, welche anhand der $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ gemessen wird (Scharhag-Rosenberger & Schommer, 2013).

1.4 Körpereigene Fett- und Kohlenhydratdepots

Wenn mehr Nahrung zugeführt wird, als der Körper braucht, werden die daraus gewonnenen Stoffe in körpereigenen Speichern aufbewahrt. Wie schon erwähnt, werden Kohlenhydrate unter anderem in der Leber und der Skelettmuskulatur, in Form von Glykogen, gespeichert. Für intensive Belastungen wird das Glykogen aus den intramuskulären Reserven zuerst genutzt. Mit fortschreitender Dauer der Belastung wird der Leberglykogen - Speicher hinzugeschaltet. Bei Triglyceriden bzw. Fetten, welche speziell bei langanhaltenden Ausdauerbelastungen

abgebaut werden, befindet sich der Speicher im Unterhautfettgewebe. Eiweiße haben kein eigenes Depot, jedoch kann der Organismus Energie aus dem Aminosäurepool beziehen. Die gespeicherte Energie, die unmittelbar abgerufen werden kann, beträgt bei einem Mann mit 70-75 kg Körpermasse ca. 20 kJ an energiereichen ATP und CrP. Der Kohlenhydratspeicher hat eine Reserve von 7112 kJ, beeinflussende Faktoren sind hier der Trainingszustand und das Ernährungsverhalten (Lamprecht et al., 2017). Schnabel et al. (2016) schätzen die Glykogen - Reserven von Leber und Skelettmuskulatur auf insgesamt 7531 kJ. Die vorhandenen Fettdepots werden bei einem durchschnittlichen Menschen mit einem Energiegehalt von 343088 kJ angegeben. Diese Menge an Fett im menschlichen Körper würde theoretisch für einen Marathonlauf von 67 h ausreichen (Schabel et al., 2016).

1.5 Ernährung im Sport

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen der Ernährung im Sport, sowie populäre Ernährungsformen präsentiert.

1.5.1 Ernährungsformen

1.5.2 Low Carb und High Fat Diätformen

Unter der Low Carb Ernährungsform wird eine Reduktion der Kohlenhydrate bei gleichzeitiger Erhöhung der Fette verstanden. Der Gesamtkalorienbedarf bleibt dabei unverändert. Eine Empfehlung für die Nährstoffverteilung bei einer Low Carb Diät ist, den Kohlenhydratanteil unter 25% und den Fettanteil über 65% des täglichen Gesamtkalorienbedarfs zu halten (Mosler, 2016). Zu ähnlichen Werten kommen Chang et al. (2017). Sie stellen fest, dass bei einer Low Carb Diät auf eine Nährstoffverteilung von weniger als 20% KH, mehr als 50% aus Fetten und den Rest aus Eiweißen des täglichen Gesamtkalorienbedarfs zu achten ist. Die modifizierte Atkins Diät (MAD), ist eine weitere Form der Low Carb Diät, bei der der KH-anteil auf maximal 20 g Kohlenhydrate pro Tag reduziert wird. Laut Kossoff und Dorward (2008) werden im Vergleich zur ketogenen Diät, bei der die Einnahme der KH konstant bleibt, die KH nach einem Zeitraum von einem Monat gesteigert. Ein Beispiel wäre die tägliche KH-Zufuhr bei Erwachsenen auf 15g pro Tag zu beschränken jedoch im folgenden Monat auf 20-30 g pro Tag zu erhöhen. Auch der Fettanteil wird bei der MAD geringer gehalten als bei der ketogenen Ernährung (Mosler, 2016). Die MAD ist durch ihren erhöhten Proteinanteil von 35% des täglichen Gesamtkalorienbedarfs gekennzeichnet. Der Anteil der KH beträgt bei der MAD 10-

20 g/Tag. Der Fettanteil wird bei der MAD auf 60-65% der täglichen Gesamtkalorien reduziert (Kossoff et al., 2006). Weitere KH-reduzierte Diäten beschreiben Lamprecht et al. (2017). Diese heben die Stillman Diät hervor, die durch einen Kohlenhydratanteil von 3%, einem Fettanteil von 33% und einem Proteinanteil von 64% der prozentuellen Tagesenergiezufuhr gekennzeichnet ist. Der Hintergrund der kohlenhydratreduzierten Ernährung ist der verbesserte Zugriff auf die körpereigenen Fettreserven. Als unwissentliche Vorreiter auf diesem Gebiet sind die Inuit zu nennen, die sich zu 85% aus Fetten und zu 15% aus KH ernähren. Die Hauptnahrungsquelle der Inuit sind bzw. waren Rentiere. Trotz dieser einseitigen Ernährung war es den Inuit möglich ihren anstrengenden Alltag, mit teilweise langen Fußmärschen zu bewältigen. Die hauptsächliche Ernährung aus Fetten führt zu einer ketogenen Adaption (Mosler, 2016). Der Körper ist bei Kohlenhydratverzicht dazu gezwungen, seine Energie aus einem anderen Makronährstoff zu beziehen, da die Organe, vor allem das Gehirn, auf Energie angewiesen sind. Der Zeitpunkt dieser Umstellung fängt nach der Entleerung der Glykogen - Reserven aus Leber und Muskeln an. Zunächst greift der Organismus auf die körpereigenen Aminosäuren zurück. Bei weiterhin ausbleibender Kohlenhydratezufuhr, werden β -Hydroxybutyrat, Acetoacetat und Aceton gebildet. Diese Ketonkörper werden in der Leber produziert (Bahr et al., 2018).

1.5.3 Ketogene Diät

Durch die Reduktion der KH auf 10-20 g pro Tag bzw. 5% des täglichen Gesamtkalorienbedarfs, wird der Körper in erster Linie dazu gebracht, Fett als Energiequelle zu nutzen (Paoli et al., 2015). Die Abnahme der Glukoseverfügbarkeit im Körper führt zu einem Stoffwechselzustand der Ketose genannt wird. Laut Burke (2021) tritt diese Adaption nach drei bis vier Wochen ein. In weiterer Folge kommt es in der Ketose zu einem Anstieg der Ketonkörper Acetocetat und β -Hydroxybutyrat, wobei letzterer der Energietransporter in den peripheren Geweben ist und als Indikator im Blut für eine ernährungsbedingte Ketose herangezogen wird. Die Ketonkörper ersetzen bei einer Ketose die Hauptenergiequelle Glukose, die für das Gehirn und andere Körpergewebe essentiell ist (Bowler & Polman, 2020). Laut Paoli et al. (2015) sieht die tägliche Nährstoffverteilung bei einer ketogenen Ernährungsweise folgendermaßen aus: 80% Fette, 15% Eiweiße und 5% Kohlenhydrate. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Bowler und Polman (2020), die von einer Nährstoffverteilung, von mindestens 60% Fetten, 5% Kohlenhydraten und den Rest an Eiweißen, überzeugt sind. Hingegen sind Aragon et al. (2017) der Meinung, dass bereits bei einer Zufuhr von maximal 50

g bzw. 10% KH des täglichen Gesamtkalorienbedarfs, der Körper in den Stoffwechselzustand der Ketose fällt.

1.5.4 Supplementation und Auswirkungen von Ketonkörpern

Für sportliche Höchstleistungen bedarf es der Anpassung von Trainings- und Ernährungsstrategien an den Athlet*innen, dazu gehören unter anderem die Anpassung und Zufuhr der Makronährstoffe in einer geeigneten Verteilung. Wie in Punkt 1.5.1 beschrieben, entstehen Ketonkörper, wenn weniger als 5-10% KH des täglichen Gesamtkalorienbedarfs zugeführt werden. Dadurch steigt die Anzahl der zirkulierenden freien Fettsäuren und führt zur Bildung der Ketonkörper, die den Brennstoff Glukose ersetzen. Weitere Aufgaben der Ketonkörper sind unter anderem die Abschwächung der Glukoseverwertung, da die Ketonkörper von der arbeitenden Muskulatur während des Trainings genutzt werden (Evans et al., 2017). Einen weiteren Vorteil der Ketonkörper beschreiben Féry und Balasse (1988). Diese behaupten, dass der Laktatwert nach einer Belastung verringert werden kann, wenn Ketonkörper als exogene Energiequelle genutzt werden. Die exogene Energiequelle kann in Form von Präparaten wie β HB-Salzen oder Ketonestern zugeführt werden und eine akute Ernährungsketose erzeugen.

1.5.5 High Carb und Low Fat Diät

Im Gegensatz zur LCHF Diät wird bei der HCLF Diät darauf geachtet, den größten Teil des täglichen Gesamtkalorienbedarfs aus Kohlenhydraten zu beziehen. Die Nährstoffverteilung wird von Iacovides und Meiring (2018) mit 55% Kohlenhydraten, 20% Fetten und 25% Eiweißen des täglichen Gesamtkalorienbedarfs angegeben. Eine einheitliche Verzehrmenge an KH bei einer kohlenhydratbasierten Diät gibt es nicht. Seid und Rosenbaum (2019) sprechen bei einer HCLF Diät von 10% Fetten, 75% KH, 15% Eiweißen des täglichen Gesamtkalorienbedarfs. Zu ähnlichen Mengen kommen Prins et al. (2019), diese verweisen bei einer High Carb Diät auf eine Verteilung von 60-65% Kohlenhydraten, 15-20% Eiweißen, 20% Fetten. In einer Studie von Hermanns (2009) wurden übergewichtige Patient*innen mit vier verschiedenen Diäten konfrontiert. Zwei dieser Diäten wurden als Low Fat und High Carb bezeichnet. Der KH-anteil bei diesen Diäten lag bei 55% und 65% der täglichen Gesamtkalorienbilanz. Hinsichtlich der Gewichtsabnahme bei den verschiedenen Diätformen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Spanne der

Nährstoffverteilung im Hinblick auf Kohlenhydrate in den verschiedenen Studien liegt bei einer High Carb Ernährung zwischen 55% bis 75%.

1.5.6 Paleo Diät

Laut Frączek et al. (2021) basiert die Paleo Diät auf den Grundsätzen der Evolutionsbiologie. Die durch eine KH-arme bis KH-moderate Einnahme gekennzeichnet ist. Unklar ist, wie die genaue Nährstoffverteilung der damaligen Jäger und Sammler ausgesehen hat. Diese Diät zielt auf die Vermeidung von Getreide, Milch und alle raffinierten und verarbeiteten Lebensmitteln ab. Die Nahrung besteht hauptsächlich aus Fleisch, Gras- und Weidehaltung, Gemüse, Obst, Pilzen und Hülsenfrüchten. Die Nährstoffverteilung bei einer Paleo Diät ist nicht vorgegeben und kann variieren (Frączek et al., 2021). Eaton et al. (1998) geben jedoch eine Nährstoffverteilung an die folgendermaßen aussieht: 25-29% Eiweiße, 30-39% Fette und 39-40% Kohlenhydrate der täglichen Gesamtkalorienbilanz. Hingegen sehen Kuipers et al. (2010) eine Verteilung von 19-35% aus Eiweißen, 28-58% aus Fetten und 22-40% aus Kohlenhydraten der täglichen Gesamtkalorienbilanz vor. Unter anderem wird die Paleo Diät als KH-ärmere Ernährung bezeichnet und bietet aufgrund dessen eine Verbesserung der Glukosetoleranz (Frączek et al., 2021).

1.5.7 Nährstoffverteilung im Ausdauersport

Für eine*n durchschnittliche*n Bürger*in sieht die Nährstoffverteilung laut Konopka (2018) wie folgt aus. Als Beispiel für den täglichen Energiebedarf bei leichter körperlicher Arbeit wurde ein Mann mit 70 kg Körpergewicht genommen. Der Gesamtkalorienbedarf wird mit 40% Kohlenhydraten, 20% Eiweißen und 40% Fetten angegeben. Für Ausdauerathlet*innen sehen Vitale und Getzin (2019) die Nährstoffverteilung wie folgt. Die empfohlene Menge an Kohlenhydraten wird nach Intensität der Ausdauersportart berechnet. Für moderate Intensitäten werden von Vitale und Getzin (2019) 5-7 g KH/kg KG/Tag, bei moderaten bis hoch intensiven Belastungen werden Mengen von 6-10 g KH/kg KG/Tag empfohlen. 8-12 g KH/kg KG/Tag sind für Athlet*innen angemessen, die Ultra Ausdauersportarten betreiben. Die tägliche Zufuhr an Protein ist mit 1.4 g KH/kg KG/Tag angegeben und bezieht sich auf alle Intensitätsstufen. Die maximale Menge an zugeführtem Fett pro Tag liegt bei weniger als 20% des Gesamtenergiebedarfs. Zu einem ähnlichen Entschluss kommen Kruseman et al. (2020), die eine Menge zwischen 6-10 g KH/kg KG/Tag an KH, je nach Intensität und Belastung empfehlen. Die Verzehrempfehlung für Eiweiße wird mit 1.2-1.4 g KH/kg KG/Tag und Fette

mit maximal 20% des täglichen Gesamtkalorienbedarfs angegeben. Die Nährstoffverteilung ist von der Ernährungsform abhängig. So werden bei High Fat Diäten wesentlich mehr Fette und weniger KH konsumiert als angegeben.

1.5.8 Aktuelle Empfehlungen in der Sporternährung

Die Wissenschaft der Ernährung ist ein komplexes, sich widersprechendes und ständig weiterentwickelndes Thema (Deutsche Gesellschaft für Ernährung, 2020). Laufend werden neue Produkte entwickelt und Ernährungsempfehlungen abgegeben, die eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Gesundheit bei Spitzensportler*innen und der Allgemeinbevölkerung versprechen. Die Sporternährung umfasst mehrere Bereiche, unter anderem Sportmedizin, Sportwissenschaft, Diätetik, kulturelle Einflüsse und populäre Medien (Vitale & Getzin, 2019). Nach Raschka und Ruf (2012) ist die Sporternährung eine auf den/die Sportler*in und an seine/ihre Belastung angepasste Zufuhr von Nahrungsmitteln und Flüssigkeit. Zu den aktuellen Empfehlungen hinsichtlich KH-Einnahme werden bei einer sportlichen Aktivität von bis zu vier Stunden am Tag zwischen 8-12 g/kg KG/Tag empfohlen. Die Proteine sollten laut Vitale und Getzin (2019) in einer Menge von 1,2-2,0 g/kg KG/Tag eingenommen werden. Ein intensives Ausdauertraining kann einen katabolen Zustand und daraus resultierenden Muskelabbau hervorrufen, um den Muskelabbau entgegen zu wirken, ist eine Proteinmenge in der vorher genannten Menge notwendig. Zusätzlich spielt auch der Einnahmezeitpunkt der Proteine eine wesentliche Rolle. Diese sollte 0,25-0,3 g/kg KG 0-2 h nach der sportlichen Belastung betragen (Vitale & Getzin, 2019). In den letzten Jahren ist bei Athlet*innen der Ernährungstrend hochgekommen, bei dem KH reduziert, Fette in der Ernährung erhöht und ein „train-low“ Training durchgeführt werden sollen. Hier handelt es sich um ein Training, welches in einem Zustand mit einer niedrigen Glykogen Verfügbarkeit durchgeführt wird. Dies kann zu einer Hochregulierung der Fettoxidation führen, damit die Glykogenreserven geschont werden und in weiterer Folge die Zeit bis zu Erschöpfung hinauszögert wird. Dies ist vor allem bei Ultra-Ausdauerwettkämpfen von Vorteil, da die Belastung unter 70% der VO_{2max} ist und hier die hauptsächlichen Brennstoffquellen Fette sind (Vitale & Getzin, 2019).

1.6 Ausdauer und Ausdauersport

Als Ausdauersportarten werden Wettkämpfe wie Marathon, Triathlon, Schilanglauf und Mountainbiking beschrieben. Bewerbe deren Dauer und Länge bei Laufbewerben 4-24 h bei 50-150 km pro Tag und bei Radfahrten ebenfalls 4-24 h bei 160 km pro Tag betragen, werden als Ultraausdauersportarten bezeichnet (Lamprecht et al., 2017). Beispiele dafür sind die Tour de France und das Race Across America (Lamprecht et al., 2017). Die Ausdauer gehört zu den motorischen Hauptbeanspruchungsformen, zu denen unter anderem Kraft, Schnelligkeit, Beweglichkeit und Koordination gehören (Dransman, 2020). Aus physiologischer Sicht wird die Ausdauer von Tomasits und Haber (2016) so definiert „Ausdauer ist die Fähigkeit von Muskelzellen durch aktive Kontraktionen verbrauchtes ATP angemessen zu resynthesieren“. Hingegen erklären Hollmann et al. (2009), dass die Ausdauer eine physische und psychische Belastung ermöglicht, die über einen gewissen Zeitraum aufrechterhalten und nach Abbruch der Belastung schnellstmöglich regeneriert werden kann. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch die Autoren Schnabel et al. (2016): „Ausdauer als Leistungsvoraussetzung sichert eine zuverlässige Dauerbeanspruchung mit optimaler Intensität und stabiler Technik im Training und im Wettkampf und begrenzt oder verhindert gar ermüdungsbedingte Leistungseinschränkungen“. Die Autor*innen erklären, dass die Funktion der Ausdauer darin liegt, erlernte taktische Bewegungsmuster, trotz fortschreitender Ermüdung über die Dauer der Belastung zu ermöglichen (Schnabel et al., 2016). Zintl und Eisenhut (2013) gehen davon aus, dass die Ausdauer von den drei folgenden Elementen abhängt und in Leistung, Ermüdung und Wiederherstellung gegliedert wird. Die Bedeutung der Ausdauer ist es, möglichst lange psychisch und physisch gegen Ermüdung anzukämpfen und die Belastung trotz Ermüdung, bis zur Beanspruchungsgrenze, fortzusetzen (Ermüdungswiderstandsfähigkeit). Die Wiederherstellungsfähigkeit ist dadurch gekennzeichnet, dass Sportler*innen nach Beendigung einer Belastung schnellstmöglich regenerieren (Regenerationsfähigkeit) (Zintl & Eisenhut, 2013). Die Klassifizierung der Ausdauer geschieht nachfolgenden Gesichtspunkten:

- Anteil der beanspruchten Muskulatur - allgemeine und lokale Muskelausdauer

Unter der allgemeinen Muskelausdauer wird die Ausdauerleistungsfähigkeit verstanden, bei welcher der Einsatz der Muskelmasse mehr als ein Siebentel bis ein Sechstel der gesamten Skelettmuskulatur ausmacht. Die Ausdauer wird in die allgemeine anaerobe Muskelausdauer und in die allgemeine aerobe Muskelausdauer unterteilt. Limitierend für die Leistungsfähigkeit der allgemeinen Muskelausdauer sind vor allem das Herz-Kreislauf-, Atmungs- und

Stoffwechselsystem und die dazugehörige Sauerstoffaufnahme (Hollmann et al., 2009). Hingegen wird die Leistungsfähigkeit der lokalen Muskelausdauer durch den Grad der Beanspruchung begrenzt. Diese Leistungsfähigkeit hängt von der Kapillarisation, dem Myoglobingehalt, dem aeroben und anaeroben Enzymbesatz und der Größe der Glykogenspeicher der Muskulatur ab (Eisenhut & Zintl, 2013). Bei der lokalen Muskelausdauer wird bei einer Ausdauerbeanspruchung weniger als ein Siebentel bis ein Sechstel der gesamten Skelettmuskulatur für statische oder dynamische Arbeit genutzt. Die lokale Ausdauer wird in die lokale aerobe Muskelausdauer und in die lokale anaerobe Muskelausdauer unterteilt (Hollmann et al., 2009).

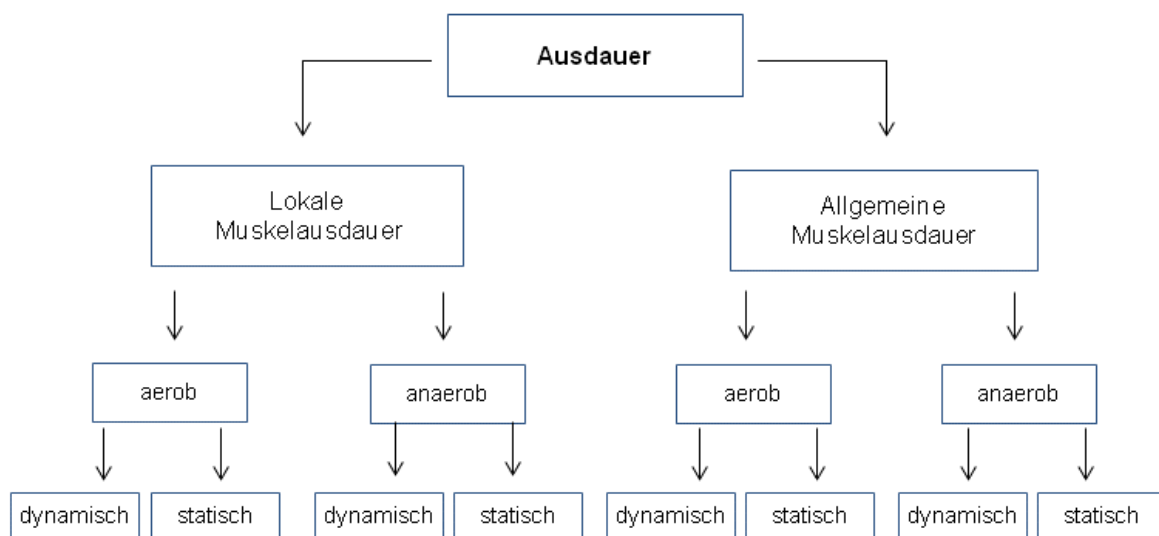


Abbildung 2: Schematische Darstellung der verschiedenen Formen von Ausdauerleistungsfähigkeit (Hollmann et al. 2009)

- Vorherrschende Energiebereitstellung - aerobe und anaerobe Ausdauer

Bei kurzen und hohen bis sehr hohen Belastungsintensitäten erfolgt die Energiegewinnung anaerob, weil die Sauerstoffzufuhr zu gering ist. Steht dem Organismus hingegen genügend Sauerstoff zur Verfügung, erfolgt die Energiegewinnung aerob, dies ist bei niedrigen bis moderaten Belastungsintensitäten der Fall (Hollmann et al., 2009).

Eine genauere Beschreibung dieses Prozesses wurde bereits, in Kapitel 1.1. Aerobe und Anaerobe Energiebereitstellung, erwähnt.

- Vorherrschende Kontraktionsbedingungen - dynamische und statische Ausdauer

Unter diesen Begriffen wird die Arbeitsweise der Muskulatur verstanden. Diese erfolgt entweder statisch, unter Dauerspannung der Muskulatur, oder dynamisch, als Wechsel zwischen Spannung und Entspannung der Muskulatur (Hollmann et al., 2009).

- Belastungszeit - Schnellkraftausdauer, Kraftausdauer, Schnelligkeitsausdauer, Kurzzeitausdauer (KZA), Mittelzeitausdauer (MZA) und Langzeitausdauer (LZA) (Hottenrott & Neumann, 2016)

Unter Schnelligkeitsausdauer werden Belastungszeiten von 10 s bis 35 s bei maximalen Geschwindigkeiten verstanden. Im Hinblick auf die sportlichen Disziplinen ergeben sich folgende Distanzen: Für Bewerbe mit der Belastungszeit von 10 s bis 35 s betragen die Distanzen beim Laufen 100 m bzw. 200 m und beim Schwimmen 50 m.

Die Belastungszeit der KZA beträgt 35 s bis 2 min. Zu einem ähnlichen Schluss kommen Zintl und Eisenhut (2013), die für die KZA eine Zeitspanne von 45 s bis 2 min definieren, bei folgenden Distanzen: für Laufbewerbe über 400 m bzw. 800 m, für Schwimmbewerbe 100 m bzw. 200 m und für Radbewerbe 1000 m.

Die MZA wird mit einer Belastungszeit von 2 min bis 10 min angegeben. Damit verbunden sind folgende Distanzen: bei Laufbewerben 1000 m und 3000 m, beim Hindernislauf 3000 m, beim Schwimmen 400 m bzw. 800 m und beim Radfahren 4000 m. Die letzte Ausdauerform bildet die Langzeitausdauer, welche in vier Zeitbereiche eingeteilt wird: bis zu 35 min bei Laufbewerben über Distanzen von 5000 m bzw. 10000 m, beim Schwimmen 1500 m und Radfahren 10-30 km; bis zu 90 min bei Laufbewerben über 20-30 km und beim Radfahren über 30-60 km. Der dritte und vierte Zeitbereich der LZA werden mit 90 min bis 360 min bzw. darüber angegeben. Diese Zeitangaben sind für folgende Disziplinen relevant: Marathonlauf und Etappenrennen bei Radbewerben. Belastungszeiten über 360 min liegen bei sportlichen Disziplinen wie Laufen, Schwimmen und Radfahren, auch in Form des Triathlons und des Iron Man, vor (Schnabel et al., 2016).

- Arten der Ausdauer – Grundlagenausdauer (GLA) und spezielle Ausdauer

Die spezielle bzw. wettkampfspezifische Ausdauer hat die Verbesserung folgender Komponenten zum Ziel: spezielle aerobe Ausdauer, spezielle Kraft- und Schnelligkeitsausdauer, Ökonomisierung der Technik, Renntaktik, Durchhaltevermögen bei hoher Beanspruchung, etc. (Zintl & Eisenhut, 2013). Die spezielle Ausdauer wird nach

Belastungszeit und dem jeweiligen Wettkampf bzw. der jeweiligen Sportart gemessen (Schnabel et al., 2016). Die GLA ist durch die aerobe Stoffwechselleistung gekennzeichnet, sie bildet die Basis der Belastbarkeit und ist sowohl beim Training als auch bei Wettkämpfen von Bedeutung (Schnabel et al., 2016). Eine gut entwickelte GLA ermöglicht dem/der Sportler*in bei Wettkämpfen hohe Geschwindigkeiten auf langen Distanzen zu erzielen (Lamprecht et al., 2017). Die Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit führt zu einer höheren Sauerstoffaufnahme und in der Folge zu einer Energiebereitstellung, die bei höheren Intensitäten von rein aerob auf partiell anaerob übergeht (Heck & Schulz, 2002).

Der Unterschied dieser beiden Ausdauerarten liegt in der Übertragbarkeit. Die Grundlagenausdauer ist auf verschiedene Sportdisziplinen übertragbar, die spezielle Ausdauer ist nur minimal übertragbar (Zintl & Eisenhut, 2013).

1.6.1 Running Economy

Die „Running Economy“ (RE) ist für Ausdauerathlet*innen ein bedeutender Leistungsphysiologischer Parameter und wird als der Energieverbrauch bei submaximaler Laufgeschwindigkeit definiert (Sperlich et al., 2015). Gemessen wird der Sauerstoffverbrauch bei konstanter und submaximaler Laufgeschwindigkeit (Sperlich et al., 2015). Barnes und Kilding (2015) erklären, dass Läufer*innen mit einer guten Laufökonomie weniger Sauerstoff verbrauchen als Läufer*innen mit einer schlechten Laufökonomie. Die RE kann trotz ähnlicher $\dot{V}O_{2\max}$ der Athlet*innen um bis zu 30% variieren. Das liegt zum Teil daran, dass sie größtenteils von der genetischen Veranlagung abhängt. Angegeben bei der RE wird der verbrauchte Sauerstoff in ml/kg/min und getestet wird diese am Laufband bei verschiedenen konstanten submaximalen Geschwindigkeiten unterhalb der respiratorischen Schwelle von 3-15 min. Dabei sollte der Zustand des Steady-States erreicht werden, bei dem die Laktatbildung im Gleichgewicht mit Laktatabbau ist (Barnes & Kilding, 2015).

1.6.2 Maximale Sauerstoffaufnahme

Auch die maximale Sauerstoffaufnahme hat im Ausdauerbereich eine große Bedeutung und ist in der Spiroergometrie der Kennwert für Ausdauerleistungsfähigkeit (Scharhag-Rosenberger & Schommer, 2013).

Unter dem Begriff $\dot{V}O_{2\max}$ wird das Zusammenspiel zwischen der Sauerstoffzufuhr, dem Sauerstofftransport und der Sauerstoffverwertung in der Ausbelastung verstanden (Zintl &

Eisenhut, 2013). Die VO₂max repräsentiert die aerobe Energieflussrate im Organismus (Neumann et al., 2021). Das Herzminutenvolumen berechnet aus Schlagvolumen multipliziert mit der Herzfrequenz, bestimmt zum größten Teil die VO₂max (Hoppeler, 2018). Außerdem ist die maximale Sauerstoffaufnahme ein Indikator für die Leistungsfähigkeit während einer höchstmöglichen Belastung und zeigt das obere Limit des kardiopulmonalen Systems an (Wonisch et al., 2003.) Angegeben wird mit der VO₂max, wie viel Sauerstoff der Körper pro Minute, bei maximaler Ausbelastung, verwerten kann. Die Einheiten für die Ausdauerleistungsfähigkeit werden in Milliliter Sauerstoff pro Minute (ml O₂/ min) angegeben (Lamprecht et al., 2017). Die VO₂max liegt bei sehr gut trainierten Ausdauerathlet*innen zwischen 70-90 ml/kg/min. Werte für Untrainierte finden sich im Bereich von 35-45 ml/min/kg (Pokan et al., 2013). Bei Personen mit einem durchschnittlichen Leistungsniveau werden Werte von 55 bis 65 ml/kg/min angegeben. Bei nichttrainierten Frauen und Männern bleibt die VO₂max bis zum 30. Lebensjahr konstant. Wird kein Ausdauersport betrieben, nimmt diese nach dem 30. Lebensjahr stetig ab. Bedingt ist dies durch die Abnahme der maximalen Herzfrequenz im Alter (Hoppeler, 2018). Frauen erreichen die Maximalwerte der VO₂max im Alter von 14-16 Jahren und Männer im Alter von 18-19 Jahren (Zintl & Eisenhut, 2013).

2 Forschungsstand

Dass die Ernährung bei körperlicher Belastung eine bedeutende Rolle spielt, war bereits in der Antike bekannt. So aßen römische Legionäre vor langen Märschen bis zu 800 g Weizenkörner pro Tag, weil sie der festen Überzeugung waren, dass diese Kost, ohne Fleisch, ihre Ausdauerleistungsfähigkeit verbessert (Konopka, 2018). Auch die damaligen Krieger Alexander des Großen (356-323 v. Chr.) ernährten sich ausschließlich auf Basis von KH-reichen Lebensmitteln (McDougall, 2015). Weiteres wurden im Westen der Türkei Knochen von Gladiatoren gefunden, die analysiert wurden. Das Ergebnis der Analyse ergab, dass diese Personen eine fast ausschließlich vegane Ernährungsweise pflegten (McDougall, 2015). Einen möglichen Grund für das damalige Verhalten liefert Mosler (2016). Die Autorin nennt KH, auch Saccharide genannt, als wichtigsten Energielieferanten für Sportler*innen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit. Für hohe Belastungsintensitäten sind KH notwendig, da die Energiegewinnung aus KH an ATP pro Liter Sauerstoff höher ist als die Oxidation aus Fettsäuren. Weiteres unterstützen KH die Regeneration nach belastenden Trainingsinterventionen oder Wettkämpfen. Ernährungsgesellschaften empfehlen die Gesamtkalorien eines Tages zu mindestens 50% aus KH zu beziehen. Bei Sportler*innen wird sogar ein KH-anteil von bis zu 65% angeraten (Lamprecht et al., 2017). Eine KH-reiche Ernährungsweise ist im modernen Zeitalter unter dem Namen „High Carb“ bekannt. Sie ist durch eine hohe KH-zufuhr, bei einer gleichzeitig niedrigen Fettzufuhr gekennzeichnet (Loeffelholz, 2009). Laut McDougall (2015) besteht die High-Carb-Diät aus 70% KH, 0% Fleisch und Milchprodukten, 10% Obst und 20% Gemüse. Konträr dazu existieren die Paleo, Low Carb oder ketogenen Ernährungsweisen. Bei der Paleo Diät werden lediglich Lebensmittel verzehrt, die in der Steinzeit vorhanden waren. Die größte Nahrungsquelle ist demnach Fleisch, Fisch, Nüsse, Beeren, Samen und Pflanzen. Es wird weitgehend auf verarbeitete Produkte wie Getreide, Milchprodukte, Öle, etc., verzichtet (Lamprecht et al., 2017). Die „Low Carb“ Ernährung beschreibt eine Ernährungsform, in der der KH Anteil möglichst geringgehalten wird (Elrott, 2006). Hinsichtlich der Ausdauerleistung ergeben sich gewisse Vorteile mit der LCHF Diät. So stellten Volek et al., (2016) fest, dass Ultra- Ausdauer Athlet*innen die mit einer Dauer von mindestens sechs Monaten Diät und einem Gesamtkalorienbedarf bestehend aus 60% Fett und 20% KH, eine höhere Belastungsintensität erreichten als die HCLF Gruppe. Außerdem zeigten die Athlet*innen eine höhere Fettoxidationsrate und eine niedrigere Kohlenhydratoxidationsrate während Ausdauerbelastung bei 64% VO_2max . Weitere Vorteile

bei einer LCHF Diät von mindestens sechs Monaten sind eine niedrigere Glykogenverwertungsrate, niedrigere Körpermasse und Körpergewicht (Chang et al., 2017). Zu anderen Ergebnissen kommen Burke et al. (2016). Diese behaupten, dass sich nach einer LC Ernährungsintervention von drei Wochen keine Vorteile hinsichtlich Abnahme der Körpermasse und Ausdauerleistung ergeben. Zwar wurde bei den LC Probanden, eine höhere Fettoxidationsrate, aber keine Verbesserung beim Zeitgehen, im Vergleich zu HC und PC, festgestellt. Als Hauptgrund nennen die Autor*innen den erhöhten Sauerstoffverbrauch der Sportler*innen bei Belastung bei einer LC Diät.

2.1 Problemstellung

Im Laufe der Evolution hatte der Nährstoff Fett eine bedeutende Rolle. Fette waren in Bezug auf die Versorgung des Körpers die primäre Energiequelle des Menschen. In Zeiten des Nahrungsmangels wurde auf die großen körpereigenen Fettreserven zurückgegriffen. Werden die Fettreserven mit den Kohlenhydratreserven im menschlichen Körper verglichen, so sind die Fettgeweberserven im Vorteil. Selbst ein Individuum mit 7-14% Körperfett hat Fettreserven von 30 000 kcal. Durch die Wende in der Landwirtschaft, änderten sich jedoch die Ernährungsgewohnheiten des Menschen. Der Verzehr von KH in jeglicher Form wurde zum Hauptbestandteil der täglichen Ernährung (Volek et al., 2016). Schon damals glaubten die Menschen, dass gewisse Ernährungsgewohnheiten, die Leistungsfähigkeit eines Individuums steigern würde. So bekamen Sklav*innen im Altertum hauptsächlich Getreide und Getreideprodukte in Form von Grütze, Brei, Fladen, etc. Athlet*innen die an Wettkämpfen teilnahmen, bekamen Schweinefleisch mit erhöhtem Fettanteil, um höhere Leistungen zu erbringen (Konopka, 2018). Im Jahre 1880 nahm Frederick Schwatka an einer 13-monatigen Expedition am Hudson's Bay, teil. Schwatka ernährte sich in diesem Zeitraum hauptsächlich von Rentierfleisch, welches einen hohen Fettanteil besitzt. Nach einer Gewöhnungsphase von zwei bis drei Wochen, war Frederick Schwatka im Stande trotz der weiten und leistungsfordernden Wegstrecken, diesen Belastungen ohne KH-einnahme zu bewältigen (Savitt, 2008). Der Glaube, dass gewisse Ernährungsmythen und Ernährungsgewohnheiten zu Höchstleistungen führen, hält sich auch noch in der heutigen Zeit. Für Forsythe et. al. (2008) liefert die fettreiche und KH-arme Ernährung einige Vorteile, die vor allem für Freizeit- und Leistungssportler*innen interessant ist. Unter anderem werden positive Effekte, wie weniger Gewebeschäden nach einer Belastung, bessere Erholung nach einer Belastung und Körperfettreduktion bei gleichzeitigem Erhalt der Muskelmasse genannt (Forsythe et al., 2008).

Zu dem berichteten Phinney und Volek (2012) über weniger Magen-Darm-Beschwerden bei Ultraausdauerläufer*innen, die sich KH-reich ernähren. Vorteile einer KH-armen und fettreichen Ernährung nennen Volek et al. (2016). Diese sind der Meinung, dass die LCHF Diät für Ausdauersportler*innen geeignet ist, unter der Voraussetzung, dass die Ernährungsweise auf längere Dauer betrieben wird. Es wurde eine Untersuchung an zwanzig Ultra Marathonläufer*innen und Ironman Bestreiter*innen durchgeführt. Eine der Gruppen ernährte sich nach dem Low Carb Prinzip und die andere nach dem High Carb Prinzip, im Durchschnitt 20 Monate lang. In dieser Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die maximale Fettoxidationsrate 2,3-mal höher als die der KH-Gruppe war. Diese Werte konnten aufgrund eines maximalen Belastungstests und eines 180-minütigen submaximalen Laufes bei 64% der $\dot{V}O_{2max}$ am Laufband festgestellt werden. Volek et al. (2016) bestätigten diese Aussage. Diese behaupten, dass sich im submaximalen Bereich bis 60-70% der $\dot{V}O_{2max}$ Vorteile hinsichtlich der Ausdauerleistung bei einer LCHF Ernährung ergeben. Burke (2021) hingegen ist der Meinung, dass die LCHF Ernährung hinsichtlich der Ausdauerleistung bei höheren Intensitäten von mehr als 80% der maximalen aeroben Kapazität zu einer Beeinträchtigung der Leistung führen kann. Selbst bei moderaten Intensitäten sind die Anpassungen jedes einzelnen an die LCHF Ernährungsweise verschieden und können Leistungsfördernd oder auch Leistungsmindernd wirken (Burke, 2021). Fakt ist, dass laut Achten und Jeukendrup (2004) die maximale Fettoxidationsrate bei Ausdauertrainierten und einer mäßigen Trainingsintensität von 59-64% $\dot{V}O_{2max}$ erreicht wird. Oberhalb dieser Grenze sinkt die Fettoxidationsrate deutlich ab. Für die Allgemeinbevölkerung würde sich einer Grenze von ca. 52% $\dot{V}O_{2max}$ ergeben. Anders sieht es laut Volek et al. (2016) bei einer langfristigen Anpassung an die LCHF Diät aus. Hier wird von einer höheren Fettoxidation bei einer gleichzeitigen niedrigeren Kohlenhydratoxidation geredet. Ausdauersportler*innen hielten sich 9-36 Monate an die LCHF Ernährung, hier lagen die maximalen Fettoxidationsrate bei 1,5 g/min bei 70% $\dot{V}O_{2max}$. Im Vergleich dazu erreichten Ausdauersportler*innen die eine HCLF Ernährung verfolgten Werte von 1,0 g/min. Weiters führt die LCHF Ernährung zu zellulären Veränderungen wie der erhöhten Mobilisierung, Transport und Aufnahme von Fetten während der Belastung. Die genauen Werte und die Bedeutung des Ketonverbrauchs sind noch nicht bekannt (Burke, 2021). Burke (2021) liefert Beweise, dass die Ketoadaption zu einer Verringerung der KH-Oxidation im Muskel führt. Nicht bekannt sind die Auswirkungen einer langfristigen Ketoadaption bezüglich der Wiederherstellung des Glykogengehalts im Muskel auf ein gewisses Niveau im Vergleich zu einer KH-reichen Ernährung. Es gibt einige Belege, die für die LCHF Diät bei

Ausdauersportler*innen sprechen, jedoch müssen gewisse Gegebenheiten vorhanden sein, damit die positiven Wirkungen eintreten. Die längerfristige Anpassung des Organismus an die LCHF Ernährung sollte gegeben sein, damit metabolische Veränderungen und Wiederherstellung des Muskelglykogens stattfinden können. Jedoch sind einige Aspekte bezüglich der längerfristigen LCHF Ernährung noch nicht genügend erforscht bzw. fehlen wissenschaftliche Belege für diese Auswirkungen (Chang et al., 2017).

2.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

Die Teilnahme an Ausdauerwettkämpfen hat weltweit zugenommen. 2015 nahmen 3,5 Millionen Menschen an einem Triathlon teil (Vitale & Getzin, 2019). Auch Ultra-Ausdauerwettkämpfe erfreuen sich an einer steigenden Teilnehmer*innenanzahl. Die körperliche, ernährungsbedingte und medizinische Herausforderung steigt durch die hohen Belastungen in den Wettkämpfen. Obwohl es jährlich neue Erkenntnisse hinsichtlich bedarfsgerechter Ernährung im Sport gibt, stehen einige Fragen noch offen und Lücken in der Literatur müssen geschlossen werden. Besonders im Spitzensport stellen sich Fragen, die optimale Ernährung oder Ernährungsformen betreffen (Vitale & Getzin, 2019). Daher ist das Ziel dieser systematischen Übersichtsarbeit, die Auswirkungen einer Low Carb bzw. High Carb Ernährung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu untersuchen. Die Forschungsfrage lautet:

Welche Unterschiede auf die Ausdauerleistungsfähigkeit bei Ausdauersportler*innen, ergeben sich bei einer Low Carb und welche bei einer High Carb Ernährungsweise?

3 Methodisches Vorgehen

Diese Arbeit dient der Untersuchung des Einflusses der Low- und High-Carb Ernährung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit bei Ausdauersportler*innen. Die Arbeit wird als systematischer Literaturreview aufgebaut.

3.1 Auswahl der Studien

Für die Beantwortung der Forschungsfrage wurde eine systematische Literaturrecherche nach PRISMA Richtlinien durchgeführt (Moher et al. 2009). Dabei wurden die online Datenbanken „Web of Science“ und „PubMed“ genutzt. Die Recherche wurde mithilfe von Operatoren bzw. Suchbegriffen aufgebaut, die in zwei Gruppen unterteilt und in Kombination in die Datenbanken eingegeben wurden.

3.2 Auswahlkriterien

Die Auswahlkriterien für die Literatursuche wurden wie folgt definiert: Die Population wurde auf Ausdauersportler*innen zwischen 18 und 65 Jahren limitiert. Die Intervention wurde als die Anwendung von High- und Low-Carb Ernährung definiert, während die Anwendung einer beliebigen anderen Ernährungsweise als Kontrollintervention herangezogen wurde. Tabelle Nr. 2 bietet einen Überblick über die angewandten Inklusions- und Exklusionskriterien.

Tabelle 2: Inklusions- und Exklusionskriterien

Kategorie	Inklusionskriterien	Exklusionskriterien
Population	Gesunde Ausdauersportler*innen	Menschen die keinen Ausdauersport betreiben, oder an einer bedeutsamen körperlichen Einschränkung z.B: schwerer Krankheit leiden.
Intervention	High- oder Low-Carb Ernährung	Keine Exklusionskriterien
Kontrollintervention	Andere Ernährungsformen	Keine Exklusionskriterien
Dauer der Intervention	Mindestens drei Wochen	Unter drei Wochen (außer KH-basierte Diäten)
Studienarten	➔ randomisierte Kontrollstudien ➔ nicht randomisierte Kontrollstudien ➔ Retrospektive Kohortenstudien	➔ Pilotstudien ➔ Kongressberichte ➔ Diplomarbeiten ➔ Systematische Reviews
Sprache	➔ Deutsch ➔ Englisch	Alle anderen Sprachen

3.3 Suchstrategien

Die Literaturrecherche wurde in dem Zeitraum von Jänner bis Mai 2022 durchgeführt. Um das Thema einzugrenzen, eine Übersicht zu erhalten und die Fragestellung zu formulieren wurde eine Übersichtsrecherche im Internet, in Fachbüchern und in Datenbanken gemacht. In den Datenbanken „Web of Science“ und „PubMed“ wurden insgesamt 183 Studien gefunden. Nach Berücksichtigung der Ein- und Ausschlusskriterien wurden insgesamt 20 Studien identifiziert. In der Vorauswahl (n=171) wurden Duplikate ausgeschlossen und die Titel sowie der jeweilige Auszug analysiert. In jedem Schritt wurden Studien exkludiert. Nachdem im letzten Schritt die Volltexte auf Eignung (n=20) beurteilt worden waren, konnten zehn Studien definitiv eingeschlossen werden. Nachfolgend steht ein PubMed und WoS Search String zur Verfügung.

- PubMed Searchstring:

(high carbohydrate diet) OR (low carbohydrate diet) AND (endurance) AND (performance)

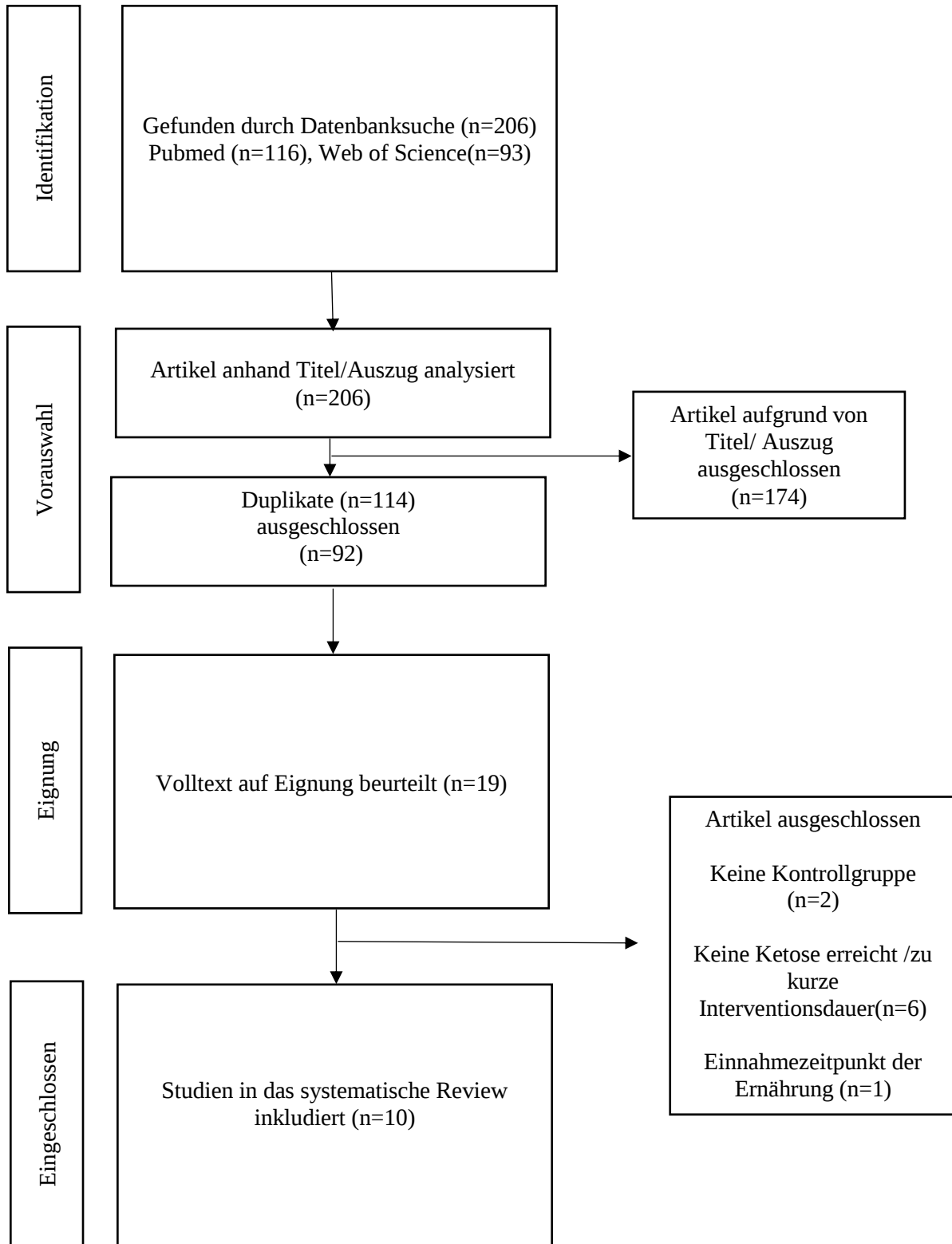
- WoS Searchstring:

endurance performance (All Fields) and low carbohydrate (All Fields) and high carbohydrate (All Fields) and low carbohydrate diet (All Fields) and high carbohydrate diet (AllFields) and All Open Access or Free to Read (Open Access) and Articles or Editorial Materials or Early Access or Proceedings Papers (Document Types)

4 Ergebnisse

4.1 Prisma Chart / Flow Diagramm

Tabelle 3: Flowchart (Moher et al. 2009) :



4.2 PEDro-Skala

Die PEDro-Skala ist eine Datenbank, die mehr als 20.000 systematische Literatur Reviews, randomisierte klinische Studien und Praxisrichtlinien umfasst. Diese wurde von Physiotherapeut*innen entwickelt um Studien nach einer elf Punkte Skala zu bewerten (Hegenscheidt et al. 2010)

Die Studien dieses Reviews konnten nicht in der PEDro Datenbank gefunden werden, deswegen wurde eine manuelle Bewertung durchgeführt.

4.3 Skalenkriterien

Die nachfolgende Auflistung der Skalenkriterien stammt aus „Physiotherapie Evidenzdatenbank“ PEDro (Hegenscheidt et al. 2010)

1. „Die Ein- und Ausschlusskriterien wurden spezifiziert“
2. „Die Probanden wurden den Gruppen randomisiert zugeordnet (im Falle von Crossover Studien wurde die Abfolge der Behandlungen den Probanden randomisiert zugeordnet)“
3. „Die Zuordnung zu den Gruppen erfolgte verborgen“
4. „Zu Beginn der Studie waren die Gruppen bzgl. der wichtigsten prognostischen Indikatoren einander ähnlich“
5. „Alle Probanden waren geblindet“
6. „Alle Therapeuten/Innen, die eine Therapie durchgeführt haben, waren geblindet“
7. „Alle Untersucher, die zumindest ein zentrales Outcome gemessen haben, waren geblindet“
8. „Von mehr als 85% der ursprünglich den Gruppen zugeordneten Probanden wurde zumindest ein zentrales Outcome gemessen“
9. „Alle Probanden, für die Ergebnismessungen zur Verfügung standen, haben die Behandlung oder Kontrollanwendung bekommen wie zugeordnet oder es wurden, wenn dies nicht der Fall war, Daten für zumindest ein zentrales Outcome durch eine ‚intention to treat‘ Methode analysiert“

10. „Für mindestens ein zentrales Outcome wurden die Ergebnisse statistischer Gruppenvergleiche berichtet“

11. „Die Studie berichtet sowohl Punkt- als auch Streuungsmaße für zumindest ein zentrales Outcome“

4.4 Übersichtstabelle

Tabelle 4: Qualitative Bewertung der ausgewählten Studien anhand der Pedro-Skala

Studienautor (Jahr)	Gesamt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Shaw et al. (2019)	5 von 11	X			X					X	X	X
Heatherly (2018)	6 von 11	X			X				X	X	X	X
Cipryan (2018)	7 von 11	X	X		X				X	X	X	X
McSwiney et al. (2018)	6 von 11	X			X				X	X	X	X
Zajac et al. (2014)	7 von 11	X	X		X				X	X	X	X
Burke et al. (2016)	6 von 11	X			X				X	X	X	X
Prins et al.(2019)	6 von 11	X			X				X	X	X	X
Achten et al. 2003	7 von 11	X			X			X	X	X	X	X
Cox et al. (2010)	8 von 11	X	X		X			X	X	X	X	X
Walker et al. (2000)	7 von 11	X	X					X	X	X	X	X

Qualität der Studien: ≥ 7 Hoch; 4 bis 6 Mittel; ≤ 3 Gering; Richtlinien der PEDro Skala (Hegenscheidt et al. 2010)

4.5 Studienübersicht

In diesem Kapitel werden die Artikel angeführt, die im Zuge des systematischen Literaturreviews eingeschlossen und analysiert wurden. In der nachstehenden Tabelle Nummer 6 werden die wichtigsten Parameter der ausgewählten Studien präsentiert. Die Analyse der Studien folgt in Kapitel 4.6.

Tabelle 5: Parameter der ausgewählten Studien

Studie	Sportart der Proband-*innen	Alter	Geschlecht	N	Ernährungsform	Interventionsdauer	Testung/Methode	Interventionsprogramm	Ergebnis
Achten et al. 2003	Ausdauerlauf	28.7 ± 2.6 Jahre	m	16	MC (41% KH) and HC (65%)	2 x 11 Tage (10 Tage Washout Periode)	Laufbandtest: 30 min bei 57% der VO _{2max} danach ohne Pause 30min bei 77% der VO _{2max} - Pause – 8 km Zeitlauf	Training: 6 x 60 min Lauf bei 74.9 ± 1.9% HFmax und 8x 16 km bis zur Ausbelastung	HC und MC im TT ↓, Laufgeschw. ↓ (HC etwas besser) Ermüdung ↑ bei MC
Cox et al. 2010	Triathlon	30.7 ± 5.6 Jahre	m	16	LC (37% KH, 49% F) HC (58% KH, 29% F)	28 Tage	100min am Ergometer bei 63% der Maximalleistung (peak power Output)	Tag 1: 30‘ Zeitfahren, Tag 2: Bergauffahrt (1-3h), Tag 3: normale Fahrt (1-3 h), Tag 4: 8 x 5 min Intervalle, Tag 5: normale Fahrt (1-3 h) Tag 6: lange Fahrt (3-5 h) für 2 Wochen	Leistung bei TT ↑ bei HC und LC
Walker et al. (2000)	gut trainierte Athletinnen	27.4± 1.4 Jahre	w	6	MC (48% KH) HC (78% KH)	7 Tage	Fahren am Ergometer bei 80% der VO _{2max} (konstant) bis keine 80-100 U/min möglich	Tag 1: 90‘ Training, Tag 2 & 3: 45‘ Training, Tag 4 & 5: 20 min Training (Radfahrer nur Radtraining, Läufer und Triathleten Mix)	HC TTE ↑ fuhr länger bei 80% VO _{2max}

Zajac et al. (2014)	Mountainbiking	28.3 ± 3.9 Jahre	m	8	MC (50% KH, 30% F) Keto (15% KH, 70% F)	28 Tage	Stufenleistungstest 90 min bei 85% der VO _{2max} danach 15 min bei 115% der VO _{2max}	Hohes Trainingsvolumen bei moderater Intensität (Vorbereitungsphase des jährlichen Trainingszyklus)	Keto KFM ↓ KM ↓ relative VO _{2max} ↑ LT VO ₂ ↑
Heatherly et al. (2018)	Marathon, Ultramarathon, Ironman und Triathlon	39.5 ± 9.9 Jahre	m	8	MC (43% KH, 38% F) LC (3-11%, 70% F)	21 Tage	5 x 10 min Lauf bei verschiedenen Geschwindigkeiten Danach 20min Pause und 5 km Zeitlauf		LC KFM ↓ KM ↓
Shaw et al. (2019)	Marathon, Triathlon und Ultramarathon	29.6 ± 5.1 Jahre	m	8	Keto (10 % KH, 75–80% F, 15–20% P); HC (43% KH, 38% F, 19% P)	31 Tage	Laufbandtest: Tag 0 und Tag 31 bei 70% der VO _{2max} bis zu willentlichen Erschöpfung	Selbst erstellter Trainingsplan für 28 Tage (Kombination aus Laufen und Radfahren)	Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Diäten bei den Zeitläufen oder VO _{2max} vor und nach den Intervention
McSwiney et al. (2018)	Ausdauersport	33 ± 11 Jahre	m	20	HC (65% KH, 20% f, 14%p); Keto (5-6% KH, 77% F, 17% P)	84 Tage	Sechs Sekunden Sprint danach 100 Km Zeitversuch – ohne Pause - Critical Power Test (am Ergometer)	7h Ausdauertraining/ Woche bei (56-68% VO _{2max}) 2x Krafttraining (70-80% 1RM)/Woche 2x HIIT Einheiten 70% Spitzenleistung/Woche	LC KFM ↓ KM ↓ CPT Maximalleistung ↑ SS Spitzenleistung ↑ LC & HC 100 KM TT ↑↓

Burke et al. (2016)	Geher	21-32 Jahre	m	29	Keto (10% KH, 75–80% F, 15– 20% P), HC (60– 65% KH, 20% F, 15– 20% P C (60–65% KH, 20% F, 15–20% P	21 Tage	Laufbandtest: 10 km und 25 km Zeitgehen	13 Einheiten pro Woche (vormittags/nachmittags Einheiten außer Sonntag) Mix aus 10-40 KM Gehen, Krafttraining, Intervalltraining und Bergtraining	HC VO _{2max} ↓ als PC und LCZeitversuch in (min) HC ↑ PC↑ LC ↓
Prins et al. (2019)	Langstreckenlauf	35.6 ± 8.4 Jahre	m	7	HC 56% KH, 15% P, 29% F Keto (6% KH, 25% P, 69% F)	42 Tage	5 km Zeitversuch am Laufband	Trainingsvolumen: LCHF Woche 1: 317 ± 156 (min/Woche) und 51.6 ± 26.0 (km/Woche) Woche 6: 326 ± 119 (min/Woche) und 50.1 ± 20.8 (km/Woche) HCLF Woche 1: 302 ± 112 (min/Woche) und 48.7 ± 19.1 (km/Woche) Woche 6: 328 ± 145 (min/Woche) und 51.9 ± 23.7 (km/Woche)	Keine signifikanten Unterschiede im 5 km Zeitversuch bei 82% der VO _{2max} zwischen ketogener und HC Gruppe
Cipryan et al. (2018)	mäßig trainierte Männer	18 - 30 Jahre	m	18	HC (48%KH, 35% F, 17% P); LC (8% KH, 63% F, 29% P)	28 Tage	Stufenleistungstest (GXT) am Laufband 5 x 3 min Intervall Sprints bei 100% VO _{2max} mit 1.5 min Erholung (Laufband)	Gesamtanzahl der Trainings und Trainingsminuten: 15.9 ± 5.5 Trainings und 1046 ± 354 Trainingsminuten der LC- Gruppe 14.1 ± 3.1 Trainings und 846 ± 515 min der HC- Gruppe	HC TTE ↑ VO _{2max} ↑ LC TTE ↑ VO _{2max} ↑ KFM ↓ Fett Oxidation ↑

Anmerkungen: ↑ = signifikante Verbesserung, ↓ = signifikante Verringerung, ↑↓ = kein Unterschied, , GXT = Graded exercise test, SS = Sechs Sekunden
LC = Low carb, LCHF = Low carb high fat, MC = Medium carb, HC = High carb, PC = Periodized Carb, KD = ketogenic diet, RM = Repetition
maximum, HIIT = High intensity intervall training, KFM = Körperfettmasse, KM = Körpermasse, TT = Time trial (Zeitversuch), TTE = Time to exhaustion,
VO_{2max} = maximale Sauerstoffaufnahme rel. VO_{2max} = relative maximale Sauerstoffaufnahme,
LT = Lactat threshold (anaerobe Schwelle), km = Kilometer, CPT = Critical Power Test

4.6 Analyse der Studien

Es nahmen zwischen 6 bis 29, durchschnittlich 13.6, Personen, an den Studien teil. Das Alter der Proband*innen lag zwischen 18 und 39.5 Jahren, mit einem Durchschnittsalter von 30.3 Jahren. Hinsichtlich des Geschlechts der Proband*innen können folgende Angaben gemacht werden. Alle Studien außer Walker et al. (2000) geben an männliche Teilnehmer getestet zu haben. Dabei wurden sowohl Athlet*innen aus dem Hobbybereich als auch Elitesportler*innen für die Untersuchungen herangezogen, wodurch das Leistungsniveau als sehr unterschiedlich beschrieben werden kann. Der Großteil der untersuchten Ausdauerathleten*innen sind Läufer (Triathlon, Marathon, Gehbewerbe) (Prins et al., 2019; Burke et al., 2016; Shaw et al., 2019; Heatherly 2018; Cox et al. 2010; Achten et al., 2003; McSwiney et al., 2018). In den von Studien Walker et al. (2000) und Cipryan et al. (2019) wurden Angaben zu der Leistungsfähigkeit der Proband*innen gemacht. In den Untersuchungen von Walker et al. (2000) wurden die Athletinnen als mäßig trainiert eingestuft. Hingegen werden die Athleten in der Studie von Cipryan et al. (2019) als gut trainiert bezeichnet.

4.6.1 Ernährungsintervention

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in den eingeschlossenen Studien insgesamt drei verschiedene Ernährungsinterventionen (LC, MC und HC) zum Einsatz kamen. Zwei weitere Studien verglichen die HC und MC Ernährung miteinander. Der Großteil der Studien hingegen befasste sich mit dem Vergleich von HC und LC Ernährung und deren Auswirkungen. Ein Vergleich zwischen der MC und LC Ernährung wurde von zwei Studien untersucht. Aufgrund der ähnlichen KH-Mengen von HC und MC wurden diese ebenfalls in diese Arbeit aufgenommen und verglichen. Unterschiede der MC, HC und LC Ernährung, wurden von einer Studie beobachtet.

4.6.2 Eingangs- und Abschlusstestungen

Die Eingangs- und Abschlusstestungen erfolgten unter verschiedenen Bedingungen und unterschieden sich hinsichtlich der Testverfahren, Dauer, Belastung, verwendeten Hilfsmittel und Distanz. In den Studien von Cox et al. 2010, Walker et al. (2000), Zajac et al. (2014) und McSwiney et al. (2018) wurden Ergometer für die Testungen verwendet. In den restlichen Studien von Achten et al. (2003), Heatherly et al. (2018), Shaw et al. (2019), Burke et al. (2016), Prins et al. (2019) und Cipryan (2018) wurden Laufbänder für die Testungen herangezogen. Um die Auswirkungen des Interventionsprogramms zu ermitteln, wurde als häufigste Methode

das Zeitfahren und der Zeitlauf verwendet. Auch Burke et al. (2016) und Prins et al. (2019) geben in ihren Untersuchungen den Zeitlauf für 25 km bzw. 10 km und 5 km an. In den Studien von Cipryan et al. (2018) und Zajac et al. (2014) wurden Stufenleistungstests angewandt. Die Dauer des Tests, in der Untersuchung von Cipryan et al. (2018), betrug 5 x 3 Minuten mit jeweils 1.5 Minuten Pause bei 100% der VO_{2max} . Zajac et al. (2014) geben einen 90-minütigen und einen 15-minütigen Ergometer Test bei 85% und 115% der VO_{2max} an. Hingegen sind die Probanden bei Shaw et al. (2019) bei 70% der VO_{2max} bis zu Erschöpfung gelaufen. In der Studie von Walker et al. (2000) wurden die Probandinnen dazu aufgefordert bei 80% der VO_{2max} zu fahren, bis keine 80-100 Umdrehungen pro Minute mehr möglich sind. Zu einer ähnlichen Vorgehensweise hinsichtlich der Eingangs- und Abschlusstestung kamen Cox et al. (2010). Die Studienteilnehmer fuhren 100 min bei 63% ihrer Maximalleistung. Die Testart von Achten et al. (2003), McSwiney et al. (2018) und Heatherly et al. (2018) unterschied sich gegenüber der anderen Testverfahren hinsichtlich des Testumfangs. Im Laufbandtest von Achten et al. (2003) liefen die Probanden 30 Minuten lang mit einer Intensität von 57,6% der VO_{2max} . Danach wurde die Geschwindigkeit erhöht, um eine VO_{2max} von 76,6% zu erreichen. Die Probanden liefen weitere 30 Minuten mit dieser Geschwindigkeit. Danach wurde das Laufband für 3 Minuten angehalten. Anschließend wurden die Probanden angewiesen 8 km so schnell wie möglich zu laufen. In der Eingangs- und Abschlusstestung von Heatherly et al. (2018) mussten die Probanden 5 x 10 Minuten Läufe bei verschiedenen Geschwindigkeiten, und nach einer 20-minütigen Pause einen 5 km Zeitlauf, absolvieren. Die längste zurückgelegte Distanz in einem Abschlusstest aller eingeschlossenen Studien, fand in der Studie von McSwiney et al. (2018) statt. Die Studienteilnehmer führten einen 6-s Sprint, einen 100 km Zeitversuch und einen Critical Power Test ohne Pause zwischen den Versuchen durch.

Abschließend werden die Studien hinsichtlich maximaler oder submaximaler Ausbelastung der Anfangs- und Endtestungen eingeteilt. Der submaximale Ausdauer test wurde insgesamt in sechs Studien und der maximale Ausdauer test in drei Studien herangezogen. In der Untersuchung von McSwiney et al. (2018) wurden beide Varianten angewandt. Die wesentlichen Unterschiede zwischen der maximalen und submaximalen Testmethode sind die Dauer, Konstante- oder Stufenbelastung, respiratorischer Quotient über 1.1 oder unter 1, Sauerstoffaufnahme, Ventilation, etc. (Wheatley et al., 2018). McSwiney et al. (2018) führten bei den Probanden einen CPT durch, welcher laut Wheatley et al. (2018) als maximaler Ausdauer test einzustufen ist. Hingegen wird das 100 km Zeitfahren als submaximaler Ausdauer test beschrieben. In den Studien von Achten et al. (2003), Heatherly et al. (2018), Shaw et al. (2019), Cox et al. 2010, Walker et al. (2000) und Zajac et al. (2014) wurden

submaximale Ausdauer Tests durchgeführt. Aufgrund folgender Eigenschaften konnten die Testungen als submaximal eingestuft werden. Konstante Belastungen bei gleichbleibender Intensität und der RER wurde mit weniger als eins angegeben. Außerdem sind die Ergebnisse der Eingangs- und Abschlusstestungen als prozentuale Anteile des Maximums von Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme, Ventilation, etc. gemessen und beschrieben worden, welche laut Wheatley et al., (2018) auf eine submaximale Testung hindeuten. Dementgegen wurden in Studien von Prins et al. (2019) und Cipryan et al. (2018) maximale Ausdauer Tests als Eingangs- und Abschlusstestung festgelegt. Prins et al. (2018) geben nach den Testungen der Probanden, einen RER zwischen 1.03 ± 0.08 und 1.14 ± 0.05 an, dieser fällt in den Bereich der maximalen Ausbelastung. Die Herzfrequenz während den Testungen in der Untersuchung von Cipryan et al. (2018), wurde in einem Bereich von 189 bis 195 Schlägen pro Minute beschrieben, diese ist ebenfalls Indikator für einen maximalen Test (Wheatley et al. 2018).

4.6.3 Interventionsprogramme

Bezüglich der Interventionsprogramme der Studien kann gesagt werden, dass die Unterschiede hinsichtlich der Trainingsfrequenz, Trainingsmethode, Trainingsdauer und des Trainingsvolumens deutlich waren. In der Studie von Heatherly et al. (2018) wurden keine Details zu dem Interventionsprogramm angegeben. Das Trainingsprogramm von Achten et al. (2003) beinhaltet, für den Zeitraum der Ernährungsintervention von zwei Mal elf Tagen, insgesamt sechs Lafeinheiten zu je 60 Minuten bei $74.9 \pm 1.9\%$ der maximalen Herzfrequenz und acht Lafeinheiten für 16 Kilometer bei denen das Belastungskriterium „all out“ war. Im Gegensatz zu Achten et al. (2003) wird bei der Studie von Shaw et al. (2019) die Planung des Trainingsprogramms den Probanden überlassen. Die Vorgaben für das Training waren, für einen Zeitraum von 28 Tagen, eine Kombination aus Lauf- und Radfahreinheiten zu planen. Eine Ähnlichkeit zu der Studie von Zajac et al. (2014) besteht darin, dass die Angabe zum Interventionsprogramm lediglich hohes Trainingsvolumen bei moderater Intensität aufweist und somit ebenfalls von den Probanden entschieden werden kann, wie die Trainingseinheiten zu gestalten sind. Genauere Angaben zu den Trainingseinheiten wurden von Prins et al. (2019) und Cipryan et al. (2018) gemacht. Prins et al. (2019) geben für die LC Gruppe in der ersten Woche ein Trainingsvolumen von 317 ± 156 Minuten und 51.6 ± 26.0 Kilometer und in der 6. Woche 326 ± 119 Minuten und 50.1 ± 20.8 Kilometer an. Für die HC Gruppe werden in der 1. Woche 302 ± 112 Minuten und 48.7 Kilometer und in der 6. Woche 328 ± 145 Minuten und 51.9 ± 23.7 Kilometer angegeben. Die Gesamtanzahl an Trainingseinheiten und Trainingsminuten wird bei Cipryan et al. (2018) für die LC Gruppe mit 15.9 ± 5.5 Einheiten

und 1046 ± 354 Minuten definiert. In der HC Gruppe sind 14.1 ± 3.1 Einheiten und 846 ± 515 Minuten absolviert worden. In den Studien von McSwiney et al. (2018) und Burke et al. (2016) werden im Interventionsprogramm neben den Ausdauerseinheiten auch Krafttrainingseinheiten beschrieben. McSwiney et al. (2018) gibt an, dass die Probanden wöchentlich sieben Stunden bei einer VO_{2max} von 56-68% trainiert haben. Zusätzlich wurde zwei Mal in der Woche ein Krafttraining mit einer Intensität 70-80% des 1 RM und zwei Einheiten HIIT in der Woche mit 70% der Spitzenleistung durchgeführt. Burke et al. (2016) geben ein 3-wöchiges Interventionsprogramm an, welches zwei Mal am Tag stattgefunden hat. Am Sonntag fand das Training nur einmal täglich statt. Die Trainingstage sind Montag bis Sonntag, an denen ein Mix aus 10-40 km Geh-, Berg- und Krafttrainingseinheiten stattgefunden haben. Im Gegensatz zu dem Interventionsprogramm welches von Burke et al. (2016) präsentiert wurde, wird in der Studie von Walker (2000) das Training über die Zeit gesteuert. Die Trainingseinheiten der Probandinnen bestand je nach ausführender Sportart, entweder aus Radfahr- oder Lafeinheiten für 20-90 Minuten in einer Woche. Cox et al. (2010) hingegen macht genauere Angaben zu den Trainingseinheiten der Probanden. So wurde an sechs Tagen pro Woche für insgesamt zwei Wochen trainiert. Die Trainingseinheiten bestanden aus Radfahrten, Zeitfahrten, Bergauffahrten, langen Fahrten und Intervallfahrten.

4.6.4 Analyse der Low Carb Studien

Es wurden insgesamt zehn Studien in den systematischen Review aufgenommen, davon beschäftigen sich acht Studien mit der Low Carb Intervention. Die ketogene Ernährungsweise wird unter dem Low Carb Begriff miteingeschlossen. Alle acht Studien werden entweder mit HC oder MC Ernährung verglichen. Im Hinblick auf die Verteilung der Makronährstoffe, in Prozent dargestellt, unterschieden sich die Angaben für KH und Fette wesentlich. Die Prozentwerte variierten von 3% bis 37% KH des täglichen Gesamtkalorienbedarfs. Im Durchschnitt wurden in der Diätphase rund 11.9% KH konsumiert. Die Interventionsdauer der KH-armen Ernährung unterschied sich hinsichtlich der Länge. Die Interventionen dauerten mindestens 21 Tage und maximal 84 Tage. Im Durchschnitt ergibt sich somit eine Interventionsdauer von 35,4 Tagen. Die Nährstoffverteilung in den LC Gruppen unterschied sich hinsichtlich der KH-Mengen. Shaw et al. (2019) und Burke et al. (2016) geben in ihren Studien Mengen von 10% KH des täglichen Gesamtkalorienbedarfs an. Die restlichen Makronährstoffe teilen sich in der Studie von Shaw et al. (2019) und Burke et al. (2016) in 75-80% Fette und 15-20% Eiweiße auf. Die Höchstmenge an zugeführten KH aller eingeschlossenen Studien lässt sich in der Studie von Cox et al. (2010) finden. Diese geben eine Menge von 37%

KH, 49% Fetten und 14% Eiweißen in der Diätphase, pro Tag an. Hingegen werden bei den Versuchen von Zajac et al. (2014) Mengen von 15% KH, 70% Fetten und 15% Eiweißen angegeben. Die restlichen Studien geben deutlich geringere Werte für Kohlenhydrate, während der Ernährungsintervention, an. McSwiney et al. (2018), Prins et al. (2019), Cipryan et al. (2018) geben während der Diätphase der Probanden Mengen von 5%, 6% und 8% KH an. Der Anteil der zugeführten Fette betrug 77%, 69% bzw. 63%. Mit einem KH-Anteil von 3-11% und einem Fettanteil von 70% der Makronährstoffverteilung wird die niedrigste Menge an KH aller eingeschlossenen Studien von Heatherly et al. (2018) beschrieben.

4.6.5 Analyse der Medium Carb und High Carb Studien

In diesem Abschnitt werden die Medium Carb und High Carb Gruppen der Studien miteinander verglichen und analysiert. Die Studien von Achten et al. (2003) und Walker et al. (2000) vergleichen nur die Ernährungsformen MC mit HC. In dem Ernährungsprotokoll dieser Studien wird eine Verteilung von 65% bzw. 78% KH in der HC Gruppe und 41% bzw. 48% KH in der MC Gruppe beschrieben. Burke et al. (2016) kommen auf ähnliche Werte hinsichtlich der Makronährstoffverteilung. Angegeben wird in der HC Gruppe eine Menge von 60-65% KH bzw. 20% Fetten und in der PC Gruppe, welche die periodisierte Kohlenhydrateinnahme beschreibt, ebenfalls 60-65% KH bzw. 20% Fetten. Nur in den Studien von Zajac et al. (2014) und Heatherly et al. (2018) werden die MC Gruppen mit den LC Gruppen verglichen. Die Probanden konsumierten dabei 50% bzw. 43% KH und 30% bzw. 38% Fette. Die Diätphasen der HC Gruppen unterschieden sich hinsichtlich der KH-Einnahme, diese betrug zwischen 43% und 65%. Die niedrigste KH-Menge wird von Shaw et al. (2019) mit 43% KH, 38% Fetten und 19% Eiweißen angegeben. Zu einer ähnlichen Makronährstoffverteilung, der Probanden, kommt Cipryan et al. (2018). Dieser beschreibt Werte von 48% KH, 35% Fetten und 17% Eiweißen. Höhere Angaben zeigen Prins et al. (2019) und Cox et al. (2010). Die Verteilung der Makronährstoffe in den Studien der vorher genannten Autor*innen beläuft sich auf 56% KH und 58% KH. Die zugeführten Fette werden mit je 29% angeführt. Mit 65% KH und 20% Fetten in der Diätphase wird der größte KH-Anteil aller eingeschlossenen Studien beschrieben. Diese Werte werden von den Autor*innen McSwiney et al. (2018) zusammengefasst. Werden die KH-Mengen von MC und HC verglichen wird deutlich, dass sich diese sich zum Teil nur gering unterscheiden. Die niedrigste KH Menge, in den untersuchten HC Gruppen, wurde von Shaw et al. (2018) mit 43% KH des täglichen Gesamtkalorienbedarfs angegeben. Im Vergleich dazu wird in den MC Gruppen die höchste Menge an KH mit 50% angegeben (Zajac et al., 2014). Die Studien, die sich mit MC Ernährung beschäftigen, wurden von den Autor*innen auch als

solche eingestuft, aber die KH Verteilung deutet darauf hin, dass diese auch als HC behandelt werden können. Die größten Unterschiede innerhalb der Ernährungsintervention ergaben sich in den HC Gruppen. Zu erkennen waren Abweichungen in Hinblick auf die Kohlenhydratverteilung zwischen den Studien.

4.7 Studienergebnisse

4.7.1 Ergebnisse der Low Carb Studien

In den Studien von Zajac et al. (2014) und Heatherly et al. (2018) konnten, nach der Interventionsphase, rein physiologische Veränderungen am Körper festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigten eine Reduktion der Körpermasse und der Körperfettmasse. Zudem gab es auch einige Studien, die zusätzlich leistungsbezogene Verbesserungen erreichen konnten. Die Untersuchungen von McSwiney et al. (2018) zeigten in diesem Zusammenhang eine positive Veränderung hinsichtlich der Critical Power Spitzenleistung bei den LC Probanden. Cipryan et al. (2018) stellten neben Reduktion der Körperfettmasse auch eine Verbesserung der Zeit bis zur Erschöpfung am Laufband, eine Verbesserung der VO_{2max} und eine Steigerung der Fettoxidation fest. Ähnliche Ergebnisse präsentieren Zajac et al. (2014) und Burke et al. (2016). Diese stellen ebenfalls eine Verbesserung der VO_{2max} fest. Zusätzlich wird in der Studie von Zajac et al. (2014) eine positive Veränderung der Sauerstoffaufnahme an der Laktatschwelle festgestellt. Hinsichtlich der Zeitläufe und Zeitfahrten bei den Disziplinen Gehen, Sechss Sekunden-Sprint und Fahren am Ergometer bei den LC Gruppen, kann gesagt werden, dass sich diese nach den Ernährungsinterventionen von McSwiney et al. (2018) und Cox et al. (2010) verbessert haben. Zu keiner Verbesserung hinsichtlich des 10 km Zeitlaufs kamen Burke et al. (2016). Auch Prins et al. (2019), konnten beim Zeitlauf von 5 km bei 82% der VO_{2max} keine Unterschiede zwischen HC und ketogenen Gruppe feststellen. Auch Shaw et al. (2019) konnten keine Unterschiede vor und nach der Diät, hinsichtlich der VO_{2max} bei der LC Gruppe und HC Gruppe feststellen.

4.7.2 Ergebnisse der High Carb Studien

Im Vergleich zu den LC Gruppen, konnte bei den HC Gruppen keine Verringerung bzw. nur eine geringe Verringerung des Körperfetts und der Körpermasse festgestellt werden. Allerdings konnte bei den Probanden von Achten et al. (2003), Cox et al. (2010) und Burke et al. (2016) eine Veränderung im Zeitfahren und Zeitlauf festgehalten werden. Eine Verschlechterung des Zeitlaufs fand in den Studien von Achten et al. (2003), in den MC- und HC Gruppen, und bei

Burke et al. (2016) in der HC Gruppe statt. Im Gegenteil dazu wurde eine Verbesserung bei Cox et al. (2010) hinsichtlich des Zeitfahrens festgestellt. Eine weitere Verbesserung nach einer HC Ernährung ist in der Studie von Walker et al. (2000) aufgetreten die Probandinnen fuhren bei 80% der VO_{2max} länger als die MC Gruppe. Cipryan et al. (2018) gibt in seiner Studie eine Verbesserung der Zeit bis zu Erschöpfung der Probanden nach der Interventionsphase an. Eine Verschlechterung der VO_{2max} kann von Burke et al. (2016) festgestellt werden. Die Abnahme der Laufgeschwindigkeit bei den HC Probanden konnte in der Untersuchung von Achten et al. (2003) beobachtet werden. Außerdem zeigte die MC Gruppe verringerte Ermüdungserscheinungen. Die Critical Power (CP) wurde von McSwiney et al. (2018) untersucht. Diese konnte, im Vergleich zur LC Gruppe, eine Abnahme der CP feststellen. Pickering (2018) äußert einige Bedenken, hinsichtlich der Ergebnisse von McSwiney et al. (2018). Die präsentierten Ergebnisse zeigen laut McSwiney et al. (2018) eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit in der LC- gegenüber der HC Gruppe an, jedoch werden diese Veränderungen relativ zum Körpergewicht angegeben. Pickering (2018) behauptet, dass die Verbesserung aufgrund des Gewichtsverlustes zu erklären ist und nicht auf andere Faktoren zurückzuführen ist. Werden die Daten auf absolute Werte korrigiert, so kann eine Verschlechterung der Werte in der LC Gruppe festgestellt werden (Pickering, 2016).

5 Diskussion

Ziel dieses systematischen Reviews war es, die Auswirkungen und Unterschiede von der Low Carb bzw. High Carb Ernährung auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu untersuchen und einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu geben. Es wurden insgesamt zwölf Studien in diesen Review eingeschlossen, die nach verschiedenen Kriterien beurteilt wurden.

Als Outcome-Variablen wurden die Körperfettmasse, Körpermasse, VO_{2max} , Fettoxidation und die Zeitläufe oder Zeitfahrten herangezogen. Die Studien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Dauer, ihrer Ernährungsinterventionen, ihres Trainingsprogramms und ihrer Ergebnisse. Die Voraussetzung für die Dauer der Ernährungsintervention der LC und Keto Gruppen waren mindestens drei Wochen, da die Ketose bei einer ketogenen Ernährungsweise nach diesem Zeitraum auftritt (Burke, 2021). Im Hinblick auf die Ergebnisse der Studien kann gesagt werden, dass die meisten Untersuchungen auf förderliche Eigenschaften in Bezug auf die Ausdauerleistungsfähigkeit, sowohl bei HC als auch LC Ernährung, nach den Interventionen gestoßen sind. Es muss beachtet werden, dass sich die Auswirkungen der Interventionen zum Teil nicht nur auf die Ausdauerleistungsfähigkeit beziehen, sondern auch auf anthropometrische Größen. Zu den positiven Veränderungen nach Ernährungsintervention bei den LC und ketogene Gruppen zählen unter anderem die Verringerung der Körperfettmasse, Verringerung der Körpermasse, Verbesserung in den Zeitläufen und Zeitfahrten, Verbesserung der Zeit bis zur Erschöpfung am Laufband, Verbesserung der VO_{2max} , Steigerung der Fettoxidation und Verbesserung der CP (Cox et al. 2010 ; Zajac et al. 2014; Heatherly et al. 2018; McSwiney et al. 2018; Cipryan et al. 2018). Hingegen sind die Ergebnisse nach HC Ernährung Verbesserung der Zeitversuche, Verbesserung der VO_{2max} und Verbesserung der Zeit bis zu Erschöpfung (Cox et al. 2010; Walker et al. 2000; McSwiney et al. 2018; Burke et al. 2016; Cipryan et al. 2018).

5.1 Interpretation der Ergebnisse

Einer der wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Resultate, nach Ernährungsintervention zwischen HC und LC, waren die veränderten Werte der Körpermasse und Körperfettmasse. In den meisten Studien in denen die Proband*innen LC oder fettreiche und KH-arme Kost konsumierten, wird deutlich, dass diese zu einem Gewichtsverlust der Athlet*innen geführt hat. Die LC Probanden in der Studie von McSwiney et al. (2018) verloren mehr Körperfettmasse und Körpermasse, die Effektstärke wird mit ($\eta^2=0.338$, $p=0.006$) für die KM und ($\eta^2=0.346$, $p=0.008$) für die KFM angegeben, welche als große Effektstärke bezeichnet wird. Der Interventionszeitraum wurde mit zwölf Wochen beschrieben und die Werte ergaben 5.2% (4.6 kg) weniger Körperfett in der LC Gruppe und 0.7% (0.5 kg) in der HC Gruppe. Laut McSwiney et al. (2018) haben die Teilnehmer*innen der LC Gruppe kein signifikant größeres Trainingsvolumen geleistet als die HC Gruppe. Jedoch wogen die LC Probanden, vor der Intervention, im Schnitt um 9.8 KG mehr und besaßen einen um 4.7% höheren KFA als die HC Gruppe, welches laut Pickering (2018) dazu führte, dass die Probanden sich hinsichtlich ihrer Leistung, relativ zu ihrem Körpergewicht verbesserten, aber nicht absolut. Auch die Crossover Studie von Zajac et al. (2014) ergab, dass nach einer 4-wöchigen LCHF Diät die Körpermasse (KG) ($\eta^2=0.552$, $p=0.011$) und die Fettmasse (%) ($\eta^2=0.471$, $p=0.012$) bei gut trainierten Mountainbikern signifikant abnahm. Diese Ergebnisse ergab ein zweiseitiger ANOVA mit Messwiederholung für das Ernährungsintervention. Der Unterschied in der Gewichtsabnahme zwischen der HC Gruppe und der LC Gruppe könnte auf eine höhere Fettoxidationsrate zurückzuführen sein. Diese wird laut Achten und Jeukendrup, (2004) bei einer mäßigen Intensität von 59-64% der VO_{2max} erreicht. Vitale und Getzin (2019) bestätigen diese Aussage, dass bei länger andauernden Ausdauerwettkämpfen, die Fettoxidation bei einer Belastung von <70% der VO_{2max} , am höchsten ist. Weiters konnte in der Untersuchung von Cipryan et al. (2018) eine erhöhte Fettoxidationsrate in g/min, bei den Proband*innen, festgestellt werden. Diese war in der LC Gruppe signifikant höher als die, der HC Gruppe. Die genauen Werte betrugen in der LC Gruppe 1.1 g/min und bei den HC Proband*innen 0.8 g/min nach der Intervention. Betrachtet man nun die Ausdauerwettkämpfe und die Intensitätsbereiche, fällt auf, dass sich Marathonläufer*innen in höheren Intensitätsbereichen von 73% bis 80% der VO_{2max} befinden (Legaz-Arese et al. 2007). Den bereits bei kürzeren Ausdauerbelastungen von 1500m liegt die VO_{2max} bei 61% bis 74% von Männern und Frauen, laut Legaz-Arese et al., (2007). Für eine maximale Fettoxidation wären diese Bereiche laut Achten und Jeukendrup, (2004) zu hoch. Hingegen sind Ultraausdauerwettkämpfe durch deutlich geringere Intensitätsbereiche gekennzeichnet. Laut einer Studie von Gimenez et al. (2013), befinden sich Athleten*innen bei

einem 24 Stunden Lauf bei konstanten acht km/h Laufgeschwindigkeit bei 39 % der VO_{2max} . Da bei dieser Intensität hauptsächlich Fette als Energiequelle herangezogen werden, werden die Kohlenhydratspeicher geschont, weil die Kohlenhydratoxidation nach hinten verschoben wird (Vitale & Getzin, 2019).

Ein weiterer Parameter, der als primäre Outcome Variable in dieser Arbeit festgelegt wurde, ist die maximale Sauerstoffaufnahme. Die VO_{2max} ist für Wettkampfzeiten, die über längere Distanzen erfolgen von Bedeutung (Raschka & Ruf, 2012). Auch für Bassett (2000) ist die maximale Sauerstoffaufnahme die wichtigste Variable im Bereich der Trainingsphysiologie und die gängigste Methode um einen Trainingseffekt festzustellen. Durch das Training und die Ernährungsintervention war eine Verbesserung der VO_{2max} bzw. der Zeit bis zu Erschöpfung in den LC und ketogenen Gruppen zu erwarten, denn laut Montero et al., (2015) kann durch Training die maximale Sauerstoffaufnahme gesteigert werden. Zumindest wurde eine statisch signifikante Verbesserung nach den LC Interventionen im Vergleich zur HC Gruppe, in den Untersuchungen von Zajac et al. (2014) ($\eta^2 = 0.751$, $p = 0.001$) und Burke et al. (2016) nachgewiesen. Eine Verbesserung der VO_{2max} (ml/kg/min) wurde bei Burke et al. (2016) nur über eine Distanz von 25 KM ($P < 0.01$) festgestellt. Die Studie von Zajac et al. (2014), welche Mountainbiker untersuchte, zeigte eine Verbesserung der VO_{2max} ($\eta^2 = 0.751$, $p = 0.001$) in allen Interventionen. Hingegen stellten Prins et al. (2018) und Shaw et al. (2019) fest, dass es keine Unterschiede hinsichtlich der Verbesserung der VO_{2max} zwischen LC und HC gibt. Eine mögliche Ursache für die fehlenden Verbesserungen der LC-Proband*innen, könnte hier die gewählte Intensität der Belastung im Eingangs- bzw. Abschlusstest sein, da diese mit >70% zu hoch angesetzt wurde, um die leistungsphysiologischen Vorteile der LC oder ketogenen Ernährung hervorzubringen.

Hingegen wird bei den Testungen von Cipryan et al. (2018) eine Intensität von 100% der VO_{2max} und bei Shaw et al. (2019) 70% der VO_{2max} beschrieben. Da sich hier weder bei LC oder HC eine Verbesserung ergeben hat, stellt sich die Frage, ob lediglich die Testung dafür verantwortlich ist. Weitere mögliche Gründe könnten die Trainingsinterventionen gewesen sein, die zum Teil selbst von den Probanden erstellt wurden (Shaw et al. 2018).

Eine Verbesserung beim Zeitfahren und Zeitlauf wurde in allen Studien erwartet, die ein regelmäßiges Ausdauertrainingsprogramm durchführten. Diese Erwartungen wurden jedoch nur teilweise erfüllt, da lediglich zwei Studien, die sich mit LC und HC beschäftigten haben, eine diesbezügliche Verbesserung nachweisen konnten (Cox et al. 2010; Burke et al. 2016). Wie bereits erwähnt, könnte ein möglicher Ansatz für die Verbesserung des Zeitfahrens und

Zeitlaufes der Probanden, vor und nach den Interventionen, das verbesserte Verhältnis von Gewicht zur Leistung, laut Sitko et al. (2019), sein. In der Untersuchung Cox et al. (2010) verbesserten sich alle Probanden nach der Trainings- und Ernährungsintervention, sowohl LC als auch HC, wobei die LC Gruppe minimal schneller in den Zeitfahrten war. Es konnte eine Verbesserung in allen Gruppen von $6.2\% \pm 6.3\%$ festgestellt werden. In der Studie von Burke et al. (2016) hingegen, verbesserten sich die HC und periodisierte Kohlenhydratzufuhr Probanden nach dem Interventionszeitraum. In der HC Gruppe konnte eine Verbesserung vom ersten auf das zweite Rennen (10 km), um 6.6% und in der PC Gruppe um 5.3% festgestellt werden. Wird nun die Gesamtheit der Ergebnisse der Studien von LC und HC betrachtet, kann gesagt werden, dass sich die Probanden der HC Studien lediglich in zwei Studien von Cox et al. (2010) und Burke et al. (2016) im Zeitfahren und Zeitgehen verbessert haben. Bei den LC Athleten konnte somit nur eine Studie beweisen, dass sich die Zeitfahrten nach der Interventionsphase verbessert haben. Eine mögliche Beschränkung und somit Verschlechterung des Zeitlaufs in der ketogenen Gruppe, in der Studie von Burke et al. (2016) könnte die Anpassungsphase an die ketogene Diät sein. Diese wurde zwar über 21 Tage durchgeführt, wobei dies das untere Limit für den Anstieg der Bildung von Ketonkörpern, Acetocetat und β -Hydroxybutyrat darstellt. Damit gehört diese Untersuchung zur kürzesten Interventionsdauer aller eingeschlossenen Studien dieser Recherche für die LC Ernährung (Burke et al., 2021).

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Resultate der Studien und die möglichen Gründe dafür betrachtet und angeführt. Zu beachten sind die verschiedenen Leistungsniveaus der Sportler*innen. Die Untersuchungen wurden zum Teil an Freizeitsportler*innen, aber auch an Elitesportler*innen durchgeführt. Hier spielt der allgemeine Trainingszustand eine wesentliche Rolle, da sich die Energiebereitstellung bei trainierten oder wenig trainierten Sportler*innen mit der Dauer des Wettkampfes, hinsichtlich des energieliefernden Substrates verändert. Bei einem/einer Eliteathlet*innen der/die regelmäßiges Ausdauertraining betreibt, ist die Schonung der Glykogen Speicher durch die maximale Fettoxidationsrate auch bei höheren Intensitäten, besser ausgeprägt als bei Freizeitsportler*innen (Hoppeler, 2018). Laut Hoppeler (2018) sollte die Bedeutung von Fetten als Energielieferant auch bei Intensitäten von 75-80% VO_{2max} bei trainierten Sportler*innen und 60-65% der VO_{2max} bei Untrainierten nicht unterschätzt werden. Ein weiterer wesentlicher Faktor sind die unterschiedlichen Interventionsprogramme in der Diätphase. Während in der Untersuchung von Shaw et al. (2018) lediglich die Intensität für den Interventionszeitraum vorgegeben wurde, gab es in der Studie von McSwiney et al. (2018) genaue Angaben hinsichtlich Dauer, Intensität und Häufigkeit des Trainings pro Woche. Wird

die Dauer der durchgeführten Intervention, dieser beiden Studien, betrachtet, so kann festgehalten werden, dass diese sich hinsichtlich ihrer Länge deutlich unterscheiden. Die Proband*innen die in der Studie von McSwiney et al. (2018) mitwirkten, unterzogen sich einer Intervention von 84 Tagen, wohingegen Shaw et al. (2018) lediglich 28 Tage für die Interventionsdauer angibt. Laut Seiler et al. (2010) ist regelmäßiges Ausdauertraining, welches mehrmals in der Woche bei verschiedenen Intensitäten über einen gewissen Zeitraum stattfindet, von Bedeutung, wenn es um Leistungsmaximierung geht. Dies zeigen auch die Ergebnisse von Shaw et al. (2018), die keine signifikanten Verbesserungen bzw. Veränderung vor und nach der Intervention zwischen LC und HC feststellen konnten. Außerdem sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die Probanden*innen, die in der Studie von Shaw et al. (2018) mitwirkten, nach keinem festgelegten Trainingsplan trainierten.

Wird nun die Diät Intervention und die damit verbundene Nährstoffverteilung der Studie von Shaw et al. (2018) betrachtet, fällt auf, dass die HC Gruppe den geringsten KH Anteil aller eingeschlossen Studien hat. Damit sich Vorteile einer HC Ernährung auf die Ausdauerleistung ergeben, benötigt es zumindest eine Menge von 55% KH des täglichen Gesamtkalorienbedarfs, laut Iacovides und Meiring (2018). Im Hinblick auf die Dauer der Ernährungsintervention speziell in den LC Gruppen, ist die Länge der Diät von Bedeutung, da laut Burke (2021) der Anstieg von Ketonkörper Acetocetat und β -Hydroxybutyrat erst nach drei bis vier Wochen eintritt. Werden nun die Studien von den LC Gruppen betrachtet, wird deutlich, dass die Ernährungsinterventionen mindestens 21 Tage dauern, welches hinsichtlich der Umstellung des Stoffwechselzustandes des Körpers, das untere Limit darstellt (Burke et al., 2021). Phinney et al. (1983) deutet darauf hin, dass eine vierwöchige LC Diät, die aerobe Ausdauerleistung bei Radfahrern*innen nicht beeinflussen würde, da die Anpassungsdauer an die fettreiche Ernährung zu kurz wäre.

5.2 Limitationen

Eine Limitation dieser Arbeit ergibt sich zum einen, hinsichtlich der Nährstoffverteilung von KH, Proteinen und Fetten bei den Proband*innen. Diese unterschieden sich zum Teil wesentlich, im Hinblick auf die täglichen Gesamtkalorien und deren Verteilung von KH und Fetten. Die größten Abweichungen wurden allerdings in den Studien der LC und ketogenen Ernährung entdeckt und beschrieben. Diese Unterschiede zeigen die Vielfalt an getesteten Diäten und drücken auch die Schwierigkeit der Formulierung einheitlicher Richtwerte aus. Dies erschwerte auch den direkten Vergleich zwischen den Studien und ist eventuell auch der Grund für die zum Teil heterogenen Auswirkungen und Ergebnisse.

Auch die verschiedenen Eingangs- und Abschlusstestungen sollten nicht außer Acht gelassen werden, da sich diese hinsichtlich der Intensität unterscheiden, welche für die Energiebereitstellung und damit verbundene Brennstoffquelle relevant ist. Hinsichtlich dieses Aspekts könnten weiterführende Forschungen an Testungsmethoden und Interventionsprogramme anknüpfen und diese vergleichen um homogenere Resultate der Proband*innen zu bekommen.

5.3 Fazit

Die Ergebnisse dieser systematischen Übersichtsarbeit verdeutlichen, dass eine klare Aussage, welche Ernährungsform sich für Ausdauersportler*innen besser eignet schwer zu beantworten ist. Unterschiede zwischen Ernährungsformen und Ausdauerleistungsfähigkeit ergeben sich hinsichtlich der Intensität der betriebenen Ausdauersportart. So tendiert eine fettreiche Ernährung zu dem Trend bei lang andauernden Ausdauerbelastungen wie Ultra-Marathon förderlicher zu sein, da die Hauptbrennstoffquelle Fett ist. Hingegen werden bei kürzeren Ausdauerbelastungen und höheren Intensitäten Kohlenhydrate als Hauptenergiequelle herangezogen. Für die Ausdauerleistungsfähigkeit bedeutet dies, dass die optimale Wahl hinsichtlich der Ernährung der Athlet*innen, von der betriebenen Ausdauersportart und deren Distanz abhängt.

Literaturverzeichnis

- Achten, J., Halson, S. L., Moseley, L., Rayson, M. P., Casey, A., & Jeukendrup, A. E. (2004). Higher dietary carbohydrate content during intensified running training results in better maintenance of performance and mood state. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 96(4), 1331–1340. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00973.2003>
- Aragon, A. A., Schoenfeld, B. J., Wildman, R., Kleiner, S., VanDusseldorp, T., Taylor, L., Earnest, C. P., Arciero, P. J., Wilborn, C., Kalman, D. S., Stout, J. R., Willoughby, D. S., Campbell, B., Arent, S. M., Bannock, L., Smith-Ryan, A. E., & Antonio, J. (2017). International society of sports nutrition position stand: diets and body composition. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 14(1). <https://doi.org/10.1186/s12970-017-0174-y>
- Bahr, L., Bellmann-Strobl, J., & Michalsen, A. (2018). Die ketogene Diät – was sie kann, wie sie wirkt und wie sie gelingt. *Zeitschrift für Komplementärmedizin*, 10(02), 22–29. <https://doi.org/10.1055/a-0584-5311>
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, 1(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40798-015-0007-y>
- Bassett, D. R., Jr, & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32(1), 70–84. <https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012>
- Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J., & Stryer, L. (2018). *Stryer Biochemie*. Springer Berlin Heidelberg.

- Bowler, A.-L., & Polman, R. (2020). Role of a ketogenic diet on body composition, physical health, psychosocial well-being and sports performance in athletes: A scoping review. *Sports*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/sports8100131>
- Braun, H., Carlsohn, A., Großhauser, M., König, D., Lampen, A., Mosler, S., Nieß, A., Oberritter, H., Schäbenthal, K., Schek, A., Stehle, P., Virmani, K., Ziegenhagen, R., & Heseker, H. (2020). Position of the working group sports nutrition of the German Nutrition Society (DGE): energy needs in sports. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 71(7-8-9), 171–177. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2020.451>
- Bueno, N. B., de Melo, I. S. V., de Oliveira, S. L., & da Rocha Ataíde, T. (2013). Very-low-carbohydrate ketogenic diet v. low-fat diet for long-term weight loss: a meta-analysis of randomised controlled trials. *The British Journal of Nutrition*, 110(7), 1178–1187. <https://doi.org/10.1017/S0007114513000548>
- Burke, L. M. (2021). Ketogenic low-CHO, high-fat diet: the future of elite endurance sport? *The Journal of Physiology*, 599(3), 819–843. <https://doi.org/10.1113/JP278928>
- Burke, L. M., Ross, M. L., Garvican-Lewis, L. A., Welvaert, M., Heikura, I. A., Forbes, S. G., Mirtschin, J. G., Cato, L. E., Strobel, N., Sharma, A. P., & Hawley, J. A. (2017). Low carbohydrate, high fat diet impairs exercise economy and negates the performance benefit from intensified training in elite race walkers: Ketogenic diet impairs performance in elite race walkers. *The Journal of Physiology*, 595(9), [2785–2807](https://doi.org/10.1113/jp273230). <https://doi.org/10.1113/jp273230>
- Chang, C.-K., Borer, K., & Lin, P.-J. (2017). Low-Carbohydrate-High-Fat Diet: Can it Help Exercise Performance? *Journal of Human Kinetics*, 56(1), 81–92. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0025>

- Cipryan, L., Plews, D. J., Ferretti, A., Maffetone, P. B., & Laursen, P. B. (2018). Effects of a 4-week very low-carbohydrate diet on high-intensity interval training responses. *Journal of Sports Science & Medicine*, 17(2), 259–268.
- Colombani, P. C., & Ballmer, P. E. (2009). Die Bedeutung der Kohlenhydrate im Sport. *Schweizer Zeitschrift für Ernährungsmedizin*, 7(3), 39–42.
- Cox, G. R., Clark, S. A., Cox, A. J., Halson, S. L., Hargreaves, M., Hawley, J. A., Jeacocke, N., Snow, R. J., Yeo, W. K., & Burke, L. M. (2010). Daily training with high carbohydrate availability increases exogenous carbohydrate oxidation during endurance cycling. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 109(1), 126–134. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00950.2009>
- Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. (2020). Dge.de. <https://www.dge.de/>
- Dransmann, M. (2020). *Hochintensives Intervalltraining vs. extensive Dauermethode*. Springer Publishing.
- Eaton, S. B., Eaton, S. B., 3rd, Sinclair, A. J., Cordain, L., & Mann, N. J. (1998). Dietary intake of long-chain polyunsaturated fatty acids during the paleolithic. *World Review of Nutrition and Dietetics*, 83, 12–23. <https://doi.org/10.1159/000059672>
- Ellrott, T. (2011). Der schwierige Weg zur gesunden Ernährung: Barrieren und wie sie überwunden werden. *MMW Fortschritte der Medizin*, 153(46), 39–42. <https://doi.org/10.1007/bf03369072>
- Evans, M., Cogan, K. E., & Egan, B. (2017). Metabolism of ketone bodies during exercise and training: physiological basis for exogenous supplementation: Ketone bodies and exercise. *The Journal of Physiology*, 595(9), 2857–2871. <https://doi.org/10.1113/jp273185>

- Feil, W., Oberem, S., & Reichenauer, A. (2011). Ernährungs-Coach - mehr Leistung im Sport : gezielt ernähren. In *Sehnen und Bänder kräftigen*.
- Ferrauti, A. (Hrsg.). (2020). *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis: Lehrbuch für Studium, Ausbildung und Unterricht im Sport*. Springer Berlin Heidelberg.
- Féry, F., & Balasse, E. O. (1988). Effect of exercise on the disposal of infused ketone bodies in humans. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 67(2), 245–250. <https://doi.org/10.1210/jcem-67-2-245>
- Forsythe, C. E., Phinney, S. D., Fernandez, M. L., Quann, E. E., Wood, R. J., Bibus, D. M., Kraemer, W. J., Feinman, R. D., & Volek, J. S. (2008). Comparison of low fat and low carbohydrate diets on circulating fatty acid composition and markers of inflammation. *Lipids*, 43(1), 65–77. <https://doi.org/10.1007/s11745-007-3132-7>
- Frączek, B., Pięta, A., Burda, A., Mazur-Kurach, P., & Tyrała, F. (2021). Paleolithic diet—effect on the health status and performance of athletes? *Nutrients*, 13(3), 1019. <https://doi.org/10.3390/nu13031019>
- Gimenez, P., Kerhervé, H., Messonnier, L. A., Féasson, L., & Millet, G. Y. (2013). Changes in the Energy Cost of Running during a 24-h Treadmill Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(9), 1807–1813. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318292c0ec>
- Heatherly, A. J., Killen, L. G., Smith, A. F., Waldman, H. S., Seltmann, C. L., Hollingsworth, A., & O’Neal, E. K. (2018). Effects of ad libitum low-carbohydrate high-fat dieting in middle-age male runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 50(3), 570–579. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001477>
- Heck, H., & Schulz, H. (2002). Methoden Der Anaeroben Leistungsdiagnostik. *Deutsche*

Hegenscheidt, S., Harth, A., & Scherfer, E. (2016, Oktober 4). *PEDro-Skala*. PEDro.

<https://www.pedro.org.au/german/downloads/pedro-scale>

Hermanns, N. (2009). Die vielen Diäten und das eine Ziel – Welche Diät ist für eine Gewichtsabnahme die richtige? *Der Diabetologe*, 5(3), 212–213.

<https://doi.org/10.1007/s11428-009-0415-z>

Hollmann, W., Strüder, H. K., Diehl, J., & Tagarakis, C. (2009). *Sportmedizin Grundlagen für körperliche Aktivität. Training und Präventivmedizin. (5. Auflage)*. Schattauer. F.K. Verlag GmbH.

Hoppeler, H. (2018). Anpassungen an Ausdauertraining. In N. Bachl, H. Löllgen, H. Tschan, H. Wackerhage, & B. Wessner (Hrsg.), *Molekulare Sport- und Leistungsphysiologie. Molekulare, zellbiologische und genetische Aspekte der körperlichen Leistungsfähigkeit* (S. 291–304). Springer.

Hottenrott, K., & Neumann, G. (2016). *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen*. Meyer + Meyer Fachverlag.

Hyballa, P., & te Poel, H.-D. (2015). *Modernes Passspiel: Der Schlüssel zum High-Speed-Fußball* (G. Schnabel, H.-D. Harre, & J. Krug, Hrsg.; 2. Aufl.). Meyer & Meyer.

<https://doi.org/10.5771/9783840310768>

Iacovides, S., & Meiring, R. M. (2018). The effect of a ketogenic diet versus a high-carbohydrate, low-fat diet on sleep, cognition, thyroid function, and cardiovascular health independent of weight loss: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*, 19(1), 62. <https://doi.org/10.1186/s13063-018-2462-5>

- Klepper, J., Della Marina, A., Elpers, C., Feucht, M., Leiendecker, B., & Van Tee Heithoff, A. (2014). Leitlinien der Gesellschaft für Neuropädiatrie. Ketogene Diäten. *Ketogene Diäten*.
- Konopka, P. (2018). *Sporternährung: Grundlagen • Ernährungsstrategien • Leistungsförderung* (17. Aufl.). BLV, ein Imprint von GRÄFE UND UNZER Verlag GmbH.
- Kossoff, E. H., & Dorward, J. L. (2008). The modified Atkins diet. *Epilepsia*, 49 Suppl 8, 37–41. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2008.01831.x>
- Kossoff, E. H., McGrogan, J. R., Bluml, R. M., Pillas, D. J., Rubenstein, J. E., & Vining, E. P. (2006). A modified Atkins diet is effective for the treatment of intractable pediatric epilepsy. *Epilepsia*, 47(2), 421–424. <https://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2006.00438.x>
- Kruseman, M., Lecoultre, V., & Gremeaux, V. (2020). Nutrition for long-distance triathletes: facts and myths. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 71(10), 229–235. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2020.461>
- Kuipers, R. S., Luxwolda, M. F., Dijck-Brouwer, D. A. J., Eaton, S. B., Crawford, M. A., Cordain, L., & Muskiet, F. A. J. (2010). Estimated macronutrient and fatty acid intakes from an East African Paleolithic diet. *The British Journal of Nutrition*, 104(11), 1666–1687. <https://doi.org/10.1017/S0007114510002679>
- Lamprecht, M., Holasek, S., Konrad, M., Seebauer, W., & Hiller-Baumgartner, D. (2017). *Lehrbuch der Sporternährung: Das wissenschaftlich fundierte Kompendium zur Ernährung im Sport*.
- Legaz-Arrese, A., Munguía-Izquierdo, D., Nuviala Nuviala, A., Serveto-Galindo, O., Moliner

- Urdiales, D., & Reverter Masía, J. (2007). Average $\text{VO}_{2\text{max}}$ as a function of running performances on different distances. *Science & Sports*, 22(1), 43–49.
<https://doi.org/10.1016/j.scispo.2006.01.008>
- Loeffelholz, C. V. (2009). *Ernährungsstrategien in Kraftsport und Bodybuilding: Optimaler Muskelaufbau, beschleunigter Fettabbau, gesteigerte Kraftleistung* (1. Aufl.). Novagenics.
- Mcdougall, J., & Mcdougall, M. (2015). *Die High-Carb-Diät: Abnehmen mit den richtigen Kohlenhydraten*. riva.
- McSwiney, F. T., Wardrop, B., Hyde, P. N., Lafountain, R. A., Volek, J. S., & Doyle, L. (2018). Keto-adaptation enhances exercise performance and body composition responses to training in endurance athletes. *Metabolism: clinical and experimental*, 81, 25–34.
<https://doi.org/10.1016/j.metabol.2017.10.010>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Medicine*.
- Montero, D., Diaz-Cañestro, C., & Lundby, C. (2015). Endurance training and $\text{V}'\text{O}_{2\text{max}}$: Role of maximal cardiac output and oxygen extraction: Role of maximal cardiac output and oxygen extraction. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 47(10), 2024–2033.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000640>
- Mosler, S. (2016). „low carb“ nutrition in sports: A short overview on current findings and potential risks. *Deutsche Zeitschrift Für Sportmedizin*, 2016(04), 90–94.
<https://doi.org/10.5960/dzsm.2016.229>
- Müller, W. A., Frings, S., & Möhrle, F. (2015). *Tier- Und Humanphysiologie. Eine*

Einführung. Springer.

Müller-Esterl, W. (2018). Fettsäuresynthese und β -Oxidation. In *Biochemie* (S. 658–670). Springer Berlin Heidelberg.

Neumann, G., Pfützner, A., & Berbalk, A. (2021). *Optimiertes Ausdauertraining* (5., überarb. Aufl). Meyer & Meyer Sport.

Paoli, A., Bianco, A., & Grimaldi, K. A. (2015). The ketogenic diet and sport: A possible marriage?: A possible marriage? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 43(3), 153–162.
<https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000050>

Pauli, C., & Girreßer, U. (2014). *Ausdauersport und Ernährung: Für Breiten- und Leistungssportler*. Meyer & Meyer Sport.

Peters, A., Bruckermann, T., & Schlüter, K. (2017). Bedingungen der Zellatmung. In *Forschendes Lernen im Experimentalpraktikum Biologie* (S. 113–126). Springer Berlin Heidelberg.

Phinney, S. D., Bistrian, B. R., Evans, W. J., Gervino, E., & Blackburn, G. L. (1983). The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: preservation of submaximal exercise capability with reduced carbohydrate oxidation. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 32(8), 769–776. [https://doi.org/10.1016/0026-0495\(83\)90106-3](https://doi.org/10.1016/0026-0495(83)90106-3)

Pickering, C. (2018). Letter to the editor. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 83, e1.
<https://doi.org/10.1016/j.metabol.2017.11.015>

Pokan, R., Förster, H., Hofmann, P., Hörtnagl, H., Ledl-Kurkowski, E., & Wonisch, M. (2013). Kompendium der Sportmedizin: Physiologie. *Innere Medizin und Pädiatrie*, 1.

- Prins, P. J., Noakes, T. D., Welton, G. L., Haley, S. J., Esbenschade, N. J., Atwell, A. D., Scott, K. E., Abraham, J., Raabe, A. S., Buxton, J. D., & Ault, D. L. (2019). High Rates of Fat Oxidation Induced by a Low-Carbohydrate, High-Fat Diet, Do Not Impair 5-km Running Performance in Competitive Recreational Athletes. *Journal of Sports Science & Medicine*, 18(4), 738–750.
- Raschka, C., & Ruf, S. (2012). Sport und Ernährung: Wissenschaftlich basierte Empfehlungen und Ernährungspläne für die Praxis. *Aufl.*). Thieme, 1.
- Rassow, J., Netzker, R., & Hauser, K. (Eds.). (2022). *Duale Reihe Biochemie*. Georg Thieme Verlag KG.
- Reiche, T., & Müller, S. (2014). *Sporternährung: Bedarfsgerechte Konzepte für Ausdauer-, Kraft- und Freizeitsport (Natural Challenge: Bodybuilding und Fitness) (New Aufl.)*. *Dualedition*.
- Savitt, R. (2008). Frederick Schwatka and the search for the Franklin expedition records, 1878–1880. *The Polar Record*, 44(3), 193–210. <https://doi.org/10.1017/s0032247407007140>
- Scharhag-Rosenberger, F., & Schommer, K. (2013). Die Spiroergometrie in der Sportmedizin. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 2013(12). <https://doi.org/10.5960/dzsm.2013.105>
- Schnabel, G., Harre, H.-D., & Krug, J. (Hrsg.). (2016). *Trainingslehre - Trainingswissenschaft: Leistung - Training - Wettkampf*. Meyer & Meyer Sportverlag.
- Seid, H., & Rosenbaum, M. (2019). Low carbohydrate and low-fat diets: What we don't know and why we should know it. *Nutrients*, 11(11), 2749. <https://doi.org/10.3390/nu11112749>
- Seiler, S. (2010). What is best practice for training intensity and duration distribution in

- endurance athletes? *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 276–291. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.276>
- Shaw, D. M., Merien, F., Braakhuis, A., Maunder, E. D., & Dulson, D. K. (2019). Effect of a ketogenic diet on submaximal exercise capacity and efficiency in runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(10), 2135–2146. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002008>
- Sitko, S., Cirer-Sastre, R., & López Laval, I. (2019). Effects of a low-carbohydrate diet on performance and body composition in trained cyclists. *Nutricion Hospitalaria: Organo Oficial de La Sociedad Espanola de Nutricion Parenteral y Enteral*, 36(6), 1384–1388. <https://doi.org/10.20960/nh.02762>
- Sperlich, B., Engel, F. A., & Zinner, C. (2015). Trainingsinterventionen zur Modifikation der Laufökonomie im Mittel- und Langstreckenlauf. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 2015(09), 229–234. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2015.192>
- Tomasits, J., & Haber, P. (2016). *Leistungsphysiologie: Lehrbuch für Sport- und Physiotherapeuten und Trainer* (5. Aufl.). Springer.
- Vitale, K., & Getzin, A. (2019). Nutrition and supplement update for the endurance athlete: Review and recommendations. *Nutrients*, 11(6), 1289. <https://doi.org/10.3390/nu11061289>
- Volek, J. S., Freidenreich, D. J., Saenz, C., Kunces, L. J., Creighton, B. C., Bartley, J. M., Davitt, P. M., Munoz, C. X., Anderson, J. M., Maresh, C. M., Lee, E. C., Schuenke, M. D., Aerni, G., Kraemer, W. J., & Phinney, S. D. (2016). Metabolic characteristics of keto-adapted ultra-endurance runners. *Metabolism: Clinical and Experimental*, 65(3), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2015.10.028>

- Volek, J. S., Noakes, T., & Phinney, S. D. (2015). Rethinking fat as a fuel for endurance exercise. *European Journal of Sport Science: EJSS: Official Journal of the European College of Sport Science*, 15(1), 13–20. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.959564>
- Volek, J. S., & Phinney, S. D. (2012). *The Art and Science of Low Carbohydrate Performance. A Revolutionary Program to Extend Your Physical and Mental Performance Envelope*.
- Walker, J. L., Heigenhauser, G. J. F., Hultman, E., & Spriet, L. L. (2000). Dietary carbohydrate, muscle glycogen content, and endurance performance in well-trained women. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 88(6), 2151–2158. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.6.2151>
- Wheatley, C. M., Kannan, T., Bornschlegl, S., Kim, C., Gastineau, D. A., Dietz, A. B., Johnson, B. D., & Gustafson, M. P. (2018). *Conducting Maximal and Submaximal Endurance Exercise Testing to Measure Physiological and*.
- Wonisch, M., Hofmann, P., Pokan, R., Kraxner, W., Hödl, R., Maier, R., Watzinger, N., Smekal, G., Klein, W., & Fruhwald, F. M. (2003). *Spiroergometrie in der Kardiologie-Grundlagen der Physiologie und Terminologie*.
- Zajac, A., Poprzecki, S., Maszczyk, A., Czuba, M., Michalczyk, M., & Zydek, G. (2014). The effects of a ketogenic diet on exercise metabolism and physical performance in off-road cyclists. *Nutrients*, 6(7), 2493–2508. <https://doi.org/10.3390/nu6072493>
- Zintl, F., & Eisenhut, A. (2013). *Ausdauertraining. Grundlagen, Methoden, Trainingssteuerung*. BLV Verlagsgesellschaft mbH.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grobdarstellung der Glykolyse ausgehend vom Muskelglykogen bis zur Gleichgewichtsreaktion der Laktatdehydrogenase (Ferrauti, 2020)	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der verschiedenen Formen von Ausdauerleistungsfähigkeit (Hollmann et al. 2009).....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Physiologischer Brennwert und kalorisches Äquivalent der Grundnährstoffe (Ferrauti, 2020).....	5
Tabelle 2: Inklusions- und Exklusionskriterien	23
Tabelle 3: Flowchart (Moher et al. 2009) :	25
Tabelle 4: Qualitative Bewertung der ausgewählten Studien anhand der Pedro-Skala	27
Tabelle 5: Parameter der ausgewählten Studien	29

Abkürzungsverzeichnis

ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosintriphosphat
CP	Critical Power
CrP	Kreatinphosphat
HCLF	High Carb Low Fat
KH	8, Kohlenhydrate
KM	Körpermasse
LCHF	Low Carb High Fat
MAD	modifizierte Atkins Diät
PC	periodisierte Kohlenhydratzufuhr
RE	Running Economy
$\text{VO}_{2\text{max}}$	Maximale Sauerstoffaufnahme

Eidesstattliche Erklärung

„Ich erkläre, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst habe und nur die ausgewiesenen Hilfsmittel verwendet habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde weder an anderer Stelle eingerichtet, noch von anderen Personen (z. B. Arbeiten von anderen Personen aus dem Internet) vorgelegt“.

Wien, September 2022

Denis Kegl