



MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

„Timing und Dosis der Kohlenhydratzufuhr zur Optimierung der
Regeneration und der sportlichen Leistungsfähigkeit“

verfasst von | submitted by

Julia Müllner Bakk.rer.nat.

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

Wien | Vienna, 2026

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree
programme code as it appears on the
student record sheet:

UA 066 826

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree
programme as it appears on the student
record sheet:

Masterstudium Sportwissenschaft

Betreut von | Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Harald Tschan

„Die Ernährung ist im Ausdauersport kein Nebenschauplatz, sondern Teil der Leistungsstrategie.“

(Ingo Froböse)

Zusammenfassung

Hintergrund: Die Verfügbarkeit von Kohlenhydraten stellt einen zentralen Einflussfaktor für Leistungsfähigkeit und Regeneration im Ausdauersport dar. Während klassische Ansätze vor allem auf die Maximierung der Glykogenspeicher abzielten, zeigt die aktuelle Forschung, dass insbesondere das Timing und die Dosierung der Kohlenhydratzufuhr eine entscheidende Rolle für metabolische Prozesse und leistungsrelevante Parameter spielen. Die bestehende Evidenz ist jedoch heterogen, wodurch die Ableitung konsistenter Empfehlungen erschwert wird.

Zielsetzung: Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss des Timings sowie der Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf objektive Leistungs- und Regenerationsparameter bei ausdauertrainierten Erwachsenen systematisch zu untersuchen.

Methodik: Es wurde ein systematischer Review durchgeführt. Die Literaturrecherche erfolgte in den Datenbanken PubMed und SPORTDiscus. Eingeschlossen wurden randomisierte kontrollierte Studien sowie Crossover-Studien, die den Einfluss einer akuten Kohlenhydratzufuhr vor, während oder nach einer Ausdauerbelastung untersuchten. Insgesamt wurden 12 Studien in die Analyse einbezogen. Die methodische Qualität wurde mithilfe der PEDro-Skala bewertet.

Ergebnisse: Die Ergebnisse deuten auf einen dosisabhängigen Zusammenhang zwischen Kohlenhydratzufuhr und Leistungsfähigkeit hin, wobei insbesondere moderate bis hohe Zufuhrmengen (ca. 60–90 g/h) konsistent mit verbesserten Leistungsparametern assoziiert sind. Niedrige Zufuhrmengen zeigen hingegen keine oder nur begrenzte Effekte. Sehr hohe Zufuhrmengen (bis zu 120 g/h) können unter spezifischen Bedingungen zusätzliche Vorteile bieten, insbesondere bei angepasster gastrointestinaler Verträglichkeit. Das Timing der Zufuhr während der Belastung hat bei ausreichender Gesamtzufuhr nur einen geringen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, während eine frühzeitige Kohlenhydratzufuhr in der Regenerationsphase die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit deutlich verbessert. Darüber hinaus zeigen Mehrfach-Transport-Kohlenhydrate metabolische Vorteile gegenüber Einzelkohlenhydraten.

Schlussfolgerung: Sowohl Timing als auch Dosierung beeinflussen die Leistungsfähigkeit und Regeneration, wobei der Einfluss des Timings insbesondere in

der frühen post-exercise Phase relevant ist, während er während der Belastung eine untergeordnete Rolle spielt. Die Effektivität der jeweiligen Strategie ist kontextabhängig und wird maßgeblich durch individuelle Verträglichkeit beeinflusst. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer zielgerichteten und individualisierten Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport.

Schlüsselwörter: Kohlenhydratzufuhr, Ausdauerleistung, Regeneration, Timing, Dosierung, systematischer Review

Abstract

Background: Carbohydrate availability is a key determinant of performance and recovery in endurance sports. While traditional approaches primarily focused on maximizing glycogen stores, recent research suggests that both the timing and dosage of carbohydrate intake play a critical role in optimizing metabolic responses and exercise outcomes. However, the current body of evidence remains heterogeneous, making it difficult to derive consistent recommendations.

Purpose: This study aims to systematically examine the influence of timing and dosage of acute carbohydrate intake on objective performance and recovery parameters in endurance-trained adults.

Methods: A systematic review was conducted using the databases PubMed and SPORTDiscus. Randomized controlled trials and crossover studies investigating acute carbohydrate intake before, during, or after endurance exercise were included. A total of 12 studies met the inclusion criteria and were analyzed qualitatively. Methodological quality was assessed using the PEDro scale.

Results: The findings indicate a dose-dependent relationship between carbohydrate intake and endurance performance, with moderate to high intake levels (approximately 60–90 g/h) consistently associated with improved performance outcomes. Lower intake levels showed limited effects, while very high intake levels (up to 120 g/h) may provide additional benefits under specific conditions, particularly when gastrointestinal tolerance is trained. The timing of carbohydrate intake during exercise showed minimal impact on performance when total intake was sufficient, whereas early post-exercise intake improved recovery and subsequent performance. Additionally, multiple transportable carbohydrates demonstrated superior metabolic efficiency compared to single carbohydrate sources.

Conclusion: Both timing and dosage of carbohydrate intake influence performance and recovery in endurance exercise, with dosage and early post-exercise intake emerging as key determinants. The effectiveness of carbohydrate strategies is context dependent and influenced by individual tolerance. These findings highlight the importance of a targeted and individualized approach to carbohydrate intake in endurance sports.

Keywords: carbohydrate intake, endurance performance, recovery, timing, dosage, systematic review

Vorwort

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Rahmen des Studiums und beschäftigt sich mit der Bedeutung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport, mit besonderem Fokus auf deren Timing und Dosierung. Ziel dieser Arbeit war es, die bestehende wissenschaftliche Evidenz systematisch zu analysieren und daraus praxisrelevante Erkenntnisse für die Optimierung von Leistungsfähigkeit und Regeneration abzuleiten.

Die Wahl des Themas basiert auf der hohen Relevanz der Ernährung im leistungsorientierten Sport sowie auf dem wachsenden wissenschaftlichen Interesse an differenzierten Ernährungsstrategien. Insbesondere die Frage, inwiefern nicht nur die Menge, sondern auch der Zeitpunkt der Kohlenhydratzufuhr leistungsbestimmend ist, stellte eine zentrale Motivation für die Bearbeitung dieser Arbeit dar. Die intensive Auseinandersetzung mit der aktuellen Studienlage hat gezeigt, dass trotz zahlreicher Untersuchungen weiterhin ein Bedarf an strukturierter Aufarbeitung und Einordnung der Ergebnisse besteht.

Der Prozess der Erstellung dieser Arbeit war sowohl anspruchsvoll als auch lehrreich. Neben der Vertiefung fachlicher Kenntnisse im Bereich der Sporternährung konnte ich insbesondere meine Fähigkeiten im wissenschaftlichen Arbeiten, der kritischen Analyse von Studien sowie der strukturierten Darstellung komplexer Zusammenhänge weiterentwickeln.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Ass.-Prof. Mag. Dr. Harald Tschan, für die fachliche Unterstützung, wertvolle Anregungen und die konstruktive Begleitung während des gesamten Arbeitsprozesses. Ebenso möchte ich mich herzlich bei meiner Partnerin Carol Posseth sowie meiner Familie bedanken, die mich während dieser Zeit stets unterstützt, motiviert und begleitet haben.

Abschließend hoffe ich, dass die vorliegende Arbeit einen Beitrag zum besseren Verständnis der Rolle von Timing und Dosierung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport leisten kann und sowohl für die Wissenschaft als auch für die praktische Anwendung von Interesse ist. Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit wurde für die sprachliche Überarbeitung und stilistische Glättung einzelner Formulierungen das Tool ChatGPT verwendet. Die inhaltliche Verantwortung, kritische Prüfung und finale Formulierung sämtlicher Inhalte lagen ausschließlich bei der Verfasserin dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung _____	11
2. Theoretische Grundlagen _____	13
2.1 Ernährung und Kohlenhydratzufuhr im Ausdauerbereich _____	13
2.1.1 Bedeutung der Ernährung für den Ausdauersport _____	13
2.1.2 Rolle der Kohlenhydratzufuhr für Leistungsfähigkeit und Regeneration ____	14
2.1.3 Abgrenzung zu weiteren Makronährstoffen _____	14
2.2 Entwicklung der Sichtweise auf Kohlenhydrate im Ausdauersport _____	15
2.2.1 Frühe Empfehlungen und Carbo-Loading (1960er–1970er Jahre) _____	15
2.2.2 Etablierung der High-Carbohydrate-Strategien (1980er–1990er Jahre) ____	16
2.2.3 Paradigmenwechsel: Train-Low und Ernährungsperiodisierung (ab 2000) _____	17
2.3 Kohlenhydrate – Aufbau, Funktion und Speicherung _____	18
2.3.1 Chemischer Aufbau und Klassifikation _____	18
2.3.2 Verdauung und Absorption _____	19
2.3.3 Speicherung: Leber- und Muskelglykogen _____	19
2.3.4 Hormonelle Regulation: Rolle von Insulin und Glukosetransportern _____	21
2.4 Formen der Kohlenhydratzufuhr: flüssig vs. fest _____	21
2.4.1 Resorptionsgeschwindigkeit und glykämische Antwort _____	21
2.4.2 Flüssige Kohlenhydratformen _____	22
2.4.3 Feste Kohlenhydratformen _____	23
2.4.4 Bedeutung für Leistungsfähigkeit und Regeneration _____	23
2.5 Energiestoffwechsel im Ausdauersport _____	24
2.5.1 Grundlagen der ATP-Produktion _____	24
2.5.2 Aerober und anaerober Kohlenhydratstoffwechsel _____	25
2.5.3 Beitrag der Kohlenhydrate bei unterschiedlichen Belastungsintensitäten _____	26
2.5.4 Limitierende Faktoren: Glykogenepletion („Hitting the Wall“) _____	27
2.6 Regeneration im Kontext von Ausdauertraining und Kohlenhydraten _____	28
2.6.1 Prozesse der Glykogensynthese nach Belastung _____	28
2.6.2 Bedeutung des Timings („Glykogen-Window“) _____	29
2.6.3 Empfohlene Kohlenhydratzufuhr in der frühen Regenerationsphase ____	30
2.6.4 Praktische Umsetzung im Trainingsalltag _____	30
2.7 Timing und Dosis der Kohlenhydratzufuhr _____	31
2.7.1 Kohlenhydrataufnahme vor der Belastung _____	31

2.7.2 Kohlenhydrataufnahme während der Belastung	33
2.7.3 Praktische Umsetzung im Trainingsalltag	34
2.8 Ernährungskonzepte im Ausdauersport	35
2.8.1 High-Carbohydrate-Strategien	36
2.8.2 Klassisches Carbo-Loading	36
2.8.3 Train-Low-Strategien	37
2.8.4 Einordnung im Kontext der vorliegenden Arbeit	38
3. Methodikteil	39
3.1 Systematischer Review	39
3.2 Forschungsfrage und Zielsetzung	40
3.3 Ein- und Ausschlusskriterien	41
3.4 Literaturrecherche	43
3.5 Studienauswahl und Screening-Prozess	45
3.6 Datenextraktion und Datenaufbereitung	48
3.7 Methodische Qualitätsbewertung mittels der PEDro-Skala	48
4. Ergebnisse	52
4.1 Studiencharakteristika	54
4.2 Charakteristika der Interventionen	55
4.3 Einfluss der Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit	57
4.3.1 Einfluss der Dosierung	57
4.3.2 Einfluss des Timings	58
4.3.3 Einfluss von Kohlenhydrattyp und Darreichungsform	59
4.4 Einfluss der Kohlenhydratzufuhr auf die Regeneration	60
4.4.1 Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit	60
4.4.2 Weitere regenerative Prozesse	61
5. Diskussion	63
5.1 Einordnung der Ergebnisse im Kontext der Forschungsfrage	63
5.2 Diskussion der zentralen Einflussfaktoren	64
5.2.1 Dosierung der Kohlenhydratzufuhr	65
5.2.2 Timing der Kohlenhydratzufuhr	67
5.2.3 Kohlenhydrattyp und Darreichungsform	70
6. Methodische Einordnung und Limitationen	71
6.1 Stichprobencharakteristika und Generalisierbarkeit	72
6.2 Heterogenität der Studiendesigns und Testverfahren	72
6.3 Labor- vs. Feldbedingungen und Darmtraining	73

6.4 Belastungsdauer und Akut-Effekte _____	73
6.5 Methodik der Outcome-Bestimmung _____	73
7. Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis _____	75
8. Fazit _____	78
9. Ausblick _____	80
10. Literaturverzeichnis _____	82
11. Abbildungsverzeichnis _____	89
12. Tabellenverzeichnis _____	90
13. Abkürzungsverzeichnis _____	91
14. Eidesstattliche Erklärung _____	93

1. Einleitung

Im leistungsorientierten Ausdauersport stellt die Ernährung einen zentralen, jedoch komplexen Einflussfaktor für die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration dar (Thomas et al., 2016; Burke et al., 2017). Die vorliegende Arbeit beschränkt sich dabei explizit auf ausdauerorientierte Belastungsformen (z. B. Laufen, Radfahren) und untersucht den Einfluss der Kohlenhydratzufuhr auf Leistungsfähigkeit und Regeneration in diesem spezifischen Kontext.

Insbesondere die Verfügbarkeit von Kohlenhydraten ist von zentraler Bedeutung, da sie bei moderaten bis hohen Belastungsintensitäten die primäre Energiequelle darstellen und wesentlich zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit beitragen (Hargreaves & Spriet, 2018; Hawley & Leckey, 2015). Eine unzureichende Kohlenhydratzufuhr kann hingegen zu frühzeitiger Ermüdung, reduzierter Belastbarkeit sowie eingeschränkter Regenerationsfähigkeit führen (Coyle et al., 1995; Burke et al., 2017).

Vor diesem Hintergrund hat sich die sportwissenschaftliche Forschung in den vergangenen Jahrzehnten intensiv mit der optimalen Gestaltung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport beschäftigt (Thomas et al., 2016). Während frühe Ansätze primär auf die Maximierung der Glykogenspeicher ausgerichtet waren (Bergström & Hultman, 1966), zeigt die aktuelle Evidenz zunehmend, dass neben der Gesamtmenge insbesondere das Timing sowie die Dosierung der Kohlenhydratzufuhr eine entscheidende Rolle spielen (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2014). Moderne Ernährungskonzepte betonen daher eine differenzierte und kontextabhängige Steuerung der Kohlenhydratverfügbarkeit, die sowohl die Anforderungen der Belastung als auch nachfolgende Regenerationsprozesse berücksichtigt (Impey et al., 2018; Stellingwerff et al., 2019). Trotz dieser Fortschritte bleibt die Studienlage in Bezug auf Timing und Dosierung der Kohlenhydratzufuhr uneinheitlich (Jeukendrup., 2011; Podlogar & Wallis, 2022). Die vorhandenen Untersuchungen unterscheiden sich erheblich hinsichtlich Interventionsdesign, Dosierungen, zeitlicher Verteilung sowie der verwendeten Leistungs- und Regenerationsparameter (Burke et al., 2011; Podlogar & Wallis, 2022). Diese Heterogenität erschwert eine klare Einordnung der Effekte

einzelner Strategien und limitiert die Ableitung konsistenter Handlungsempfehlungen für die sportliche Praxis (Jeukendrup, 2014; Thomas et al., 2016). Insbesondere fehlt bislang eine systematische Zusammenführung der Evidenz, die Timing und Dosierung im direkten Zusammenhang mit akuten Ausdauerbelastungen integriert betrachtet (Podlogar & Wallis, 2022).

Vor diesem Hintergrund zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, den Einfluss des Timings sowie der Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit und auf regenerative Prozesse bei ausdauertrainierten Erwachsenen systematisch zu untersuchen. Die zentrale Forschungsfrage lautet:

Welchen Einfluss haben Timing (vor, während, nach der Belastung) und Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf objektive Leistungs- und Regenerationsparameter bei ausdauertrainierten Erwachsenen?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde ein systematischer Review durchgeführt, der sich an etablierten methodischen Leitlinien orientiert und ausschließlich randomisierte kontrollierte Studien sowie Crossover-Studien berücksichtigt. Ziel ist es, die bestehende Evidenz strukturiert zusammenzuführen, Unterschiede zwischen verschiedenen Zufuhrstrategien herauszuarbeiten und daraus fundierte und praxisrelevante Schlussfolgerungen abzuleiten.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 stellt die theoretischen Grundlagen dar und beleuchtet die physiologischen und ernährungswissenschaftlichen Zusammenhänge der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport. Kapitel 3 beschreibt das methodische Vorgehen des systematischen Reviews. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien dargestellt, die in Kapitel 5 im Kontext der bestehenden Literatur diskutiert werden. Kapitel 6 widmet sich den methodischen Limitationen der Arbeit, während Kapitel 7 praxisrelevante Implikationen ableitet. Abschließend werden in Kapitel 8 die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst und in Kapitel 9 ein Ausblick auf zukünftige Forschungsansätze gegeben.

2. Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen der vorliegenden Arbeit und ordnet die Bedeutung der Kohlenhydratzufuhr im Kontext des Ausdauersports ein. Die Arbeit bezieht sich dabei ausschließlich auf den Ausdauerbereich; andere sportliche Belastungsformen wie Kraft-, Spiel- oder Schnelldkraftsport werden nicht vertiefend betrachtet. Zunächst werden ernährungsphysiologische und sportmetabolische Grundlagen dargestellt, einschließlich der Rolle von Kohlenhydraten für Leistungsfähigkeit, Energiestoffwechsel und Regeneration. Darauf aufbauend werden Timing, Dosierung und Formen der Kohlenhydratzufuhr sowie übergeordnete Ernährungskonzepte im Ausdauersport eingeordnet. Damit schafft das Kapitel die theoretische Grundlage für die Untersuchung des Einflusses der Kohlenhydratzufuhr auf Leistungsfähigkeit und Regeneration.

2.1 Ernährung und Kohlenhydratzufuhr im Ausdauerbereich

2.1.1 Bedeutung der Ernährung für den Ausdauersport

Im Ausdauersport stellt eine adäquate Ernährung eine zentrale Voraussetzung für Leistungsfähigkeit und Regeneration dar, da eine ausreichende Energie- und Nährstoffversorgung sowie ein gezieltes Ernährungstiming zentrale physiologische Funktionen unterstützen (Amawi et al., 2024). Ein Mangel an Energie oder essenziellen Nährstoffen kann grundlegende Prozesse beeinträchtigen und sich negativ auf die Belastbarkeit, die Regenerationsfähigkeit sowie die Funktion des Immunsystems auswirken (Gleeson et al., 2004).

Demgegenüber unterstützt eine bedarfsgerechte Energie- und Nährstoffzufuhr trainingsinduzierte Anpassungsprozesse, stabilisiert zentrale Stoffwechsel- und Immunfunktionen und fördert die Erholung nach körperlicher Belastung (Burke et al., 2011; Thomas et al., 2016). Auf diese Weise können Ausdauerathlet:innen Trainingsreize effizient verarbeiten und über längere Zeiträume hinweg konstante Trainingsumfänge realisieren.

Die Makronährstoffe Kohlenhydrate, Fette und Proteine erfüllen im Ausdauersport unterschiedliche Funktionen und tragen gemeinsam zur Sicherstellung der

Energieversorgung sowie zur Unterstützung von Anpassungs- und Regenerationsprozessen bei (Hargreaves & Spriet, 2018; Phillips & van Loon, 2011; Spriet, 2014). Eine differenzierte Betrachtung ihrer spezifischen Rollen erfolgt in den folgenden Abschnitten.

2.1.2 Rolle der Kohlenhydratzufuhr für Leistungsfähigkeit und Regeneration

Innerhalb der Makronährstoffe kommt den Kohlenhydraten eine besondere Bedeutung zu, da sie während sportlicher Belastung eine schnell verfügbare Energiequelle darstellen. Sie werden in Form von Muskel- und Leberglykogen gespeichert und können bei steigender Belastungsintensität rasch zur Energiegewinnung mobilisiert werden (Hawley & Leckey, 2015).

Ein ausreichender Glykogengehalt ist eng mit der Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit verbunden, während eine Reduktion der Glykogenspeicher mit vorzeitiger Ermüdung einhergeht (Coyle, 1995). Auch im Hinblick auf die Regeneration sind Kohlenhydrate von zentraler Bedeutung. Die Wiederauffüllung der Glykogenspeicher erfolgt besonders effizient in den ersten Stunden nach Belastungsende und wird sowohl durch den Zeitpunkt als auch durch die Menge der zugeführten Kohlenhydrate beeinflusst (Ivy et al., 1988; Thomas et al., 2016). Eine angemessene Zufuhr unterstützt die rasche Wiederherstellung der Energiespeicher und verbessert die Ausgangsbedingungen für nachfolgende Trainingseinheiten. Darüber hinaus wird in der Literatur diskutiert, dass die Verfügbarkeit von Kohlenhydraten auch trainingsinduzierte Anpassungsprozesse beeinflussen kann, etwa über den Zusammenhang zwischen dem Glykogenstatus der Muskulatur und zellulären Signalwegen (Philp et al., 2012). Diese Zusammenhänge sind jedoch komplex und stark kontextabhängig, weshalb sie im weiteren Verlauf der Arbeit differenziert betrachtet werden.

2.1.3 Abgrenzung zu weiteren Makronährstoffen

Kohlenhydrate stellen bei höheren Belastungsintensitäten die bevorzugte Energiequelle dar, was sich aus spezifischen physiologischen Eigenschaften im Vergleich zu Fetten und Proteinen ergibt (Hawley & Leckey, 2015; Thomas et al., 2016). Während Fette vor allem bei niedrigen bis moderaten Intensitäten zur

Energiegewinnung beitragen, ist ihre Oxidation mit einem höheren Sauerstoffverbrauch pro erzeugter Energieeinheit verbunden, wodurch ihre Nutzung bei intensiven Belastungen limitiert ist (Jeukendrup, 2011; Spriet, 2014). Kohlenhydrate ermöglichen hingegen eine schnellere Energiebereitstellung und eine höhere Energieflussrate, was bei steigender Belastungsintensität leistungsentscheidend ist (Hargreaves & Spriet, 2018; Hawley & Leckey, 2015). Ihre Verfügbarkeit stellt somit einen zentralen Faktor für die Aufrechterhaltung intensiver Belastungen dar (Hawley & Leckey, 2015; Murray & Rosenbloom, 2018).

Proteine übernehmen primär strukturelle und funktionelle Aufgaben im Gewebeaufbau sowie in Reparatur- und Anpassungsprozessen und leisten unter normalen Bedingungen nur einen geringen Beitrag zur Energiegewinnung (Phillips & van Loon, 2011). Eine unzureichende Kohlenhydratzufuhr kann jedoch zu einer verstärkten Nutzung von Aminosäuren zur Energieproduktion führen, unter anderem über die Glukoneogenese, was bei längeren Ausdauerbelastungen beschrieben wurde (Jeukendrup, 2011).

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Kohlenhydrate im Zusammenspiel der Makronährstoffe eine Schlüsselrolle einnehmen, insbesondere im Kontext intensiver und wiederholter Belastungen. Ihre Verfügbarkeit bestimmt maßgeblich die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit und die Effizienz der Regeneration. Diese Einordnung bildet die Grundlage für die nachfolgende Betrachtung der Kohlenhydratzufuhr im Hinblick auf Timing, Dosis und Verfügbarkeit sowie deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Regeneration im weiteren Verlauf der Arbeit.

2.2 Entwicklung der Sichtweise auf Kohlenhydrate im Ausdauersport

Aufbauend auf der dargestellten zentralen Rolle der Kohlenhydrate im Ausdauersport hat sich deren ernährungsstrategische Nutzung im Verlauf der letzten Jahrzehnte kontinuierlich weiterentwickelt. Während frühe Ansätze primär auf die Maximierung der Glykogenspeicher abzielten, rückte später eine differenziertere und kontextabhängige Betrachtung der Kohlenhydratzufuhr in den Vordergrund.

2.2.1 Frühe Empfehlungen und Carbo-Loading (1960er–1970er Jahre)

Die wissenschaftliche Grundlage für die Bedeutung von Kohlenhydraten im Ausdauersport wurde in den 1960er-Jahren durch die Arbeiten von Bergström und Hultman (1966) geschaffen. Mithilfe der Muskelbiopsietechnik konnte gezeigt werden, dass eine hohe intramuskuläre Glykogenkonzentration mit einer verlängerten Belastungsdauer einhergeht, während niedrige Speicher mit vorzeitiger Ermüdung assoziiert sind. Diese Befunde wurden durch weitere Studien, unter anderem von Coyle et al. (1986), bestätigt.

Auf dieser Grundlage entwickelte sich in den 1970er-Jahren das klassische CarboLoading mit dem Ziel, die Glykogenspeicher vor Wettkämpfen gezielt zu maximieren. Frühe Untersuchungen zeigten, dass eine gezielte Erhöhung der Kohlenhydratzufuhr die Glykogenspeicher steigern kann (Bergström et al., 1967).

Spätere Untersuchungen zeigten jedoch, dass eine vorherige Entleerungsphase nicht zwingend erforderlich ist. Bereits eine reduzierte Trainingsbelastung in Kombination mit hoher Kohlenhydratzufuhr kann vergleichbare Glykogenwerte erzielen (Burke et al., 2011). Diese Anpassung erleichterte die praktische Umsetzung und führte zu alltagsnäheren Strategien (Burke et al., 2011).

Trotz methodischer Einschränkungen früher Studien legten diese Arbeiten den Grundstein für das Verständnis der leistungsrelevanten Rolle von Glykogenspeichern und etablierten das Konzept der gezielten Kohlenhydratmanipulation im Ausdauersport.

2.2.2 Etablierung der High-Carbohydrate-Strategien (1980er–1990er Jahre)

In den 1980er- und 1990er-Jahren verlagerte sich der Fokus auf die systematische Integration von Kohlenhydraten in die Trainings- und Wettkampfernährung. Studien von Coyle et al. (1986) zeigten, dass eine kohlenhydratreiche Ernährung die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit bei längeren Belastungen unterstützt.

Darauf aufbauend etablierten sich High-Carbohydrate-Strategien als dominierendes Modell in der Ausdauerernährung. Diese Entwicklung wurde durch zahlreiche Studien und Übersichtsarbeiten gestützt, insbesondere durch die Arbeiten von Jeukendrup (2014, 2017) sowie Burke et al. (2011). Auch offizielle Ernährungsempfehlungen, unter anderem des American College of Sports Medicine (Thomas et al., 2016), griffen diese Erkenntnisse auf.

Mit zunehmender Evidenz wurden differenziertere Empfehlungen zur Kohlenhydratzufuhr vor, während und nach Belastungen entwickelt, um eine ausreichende Glykogenverfügbarkeit sicherzustellen und leistungsrelevante Stoffwechselprozesse zu stabilisieren (Jeukendrup, 2017).

Gleichzeitig wurde kritisch diskutiert, dass pauschale High-Carbohydrate-Ansätze individuelle Unterschiede sowie unterschiedliche Trainingsanforderungen nur begrenzt berücksichtigen (Burke & Hawley, 2002). Diese Diskussion leitete eine differenziertere Betrachtung der Kohlenhydratzufuhr ein.

2.2.3 Paradigmenwechsel: Train-Low und Ernährungsperiodisierung (ab 2000)

Ab den 2000er-Jahren setzte sich die Erkenntnis durch, dass eine konstant hohe Kohlenhydratverfügbarkeit nicht in allen Trainingssituationen optimal ist. Stattdessen wurde der Ansatz verfolgt, die Kohlenhydratzufuhr gezielt an Trainingsinhalte und Ziele anzupassen (Hansen et al., 2005; Morton et al., 2009).

Das Konzept des „Train-Low“ stellte einen Paradigmenwechsel dar, indem Kohlenhydrate nicht mehr ausschließlich als Leistungsfaktor, sondern auch als Instrument der Trainingssteuerung betrachtet wurden („fuel for the work required“; Burke & Hawley, 2018).

Darauf aufbauend entwickelte sich das Konzept der Ernährungsperiodisierung, bei dem Phasen hoher und niedriger Kohlenhydratverfügbarkeit gezielt kombiniert werden (Impey et al., 2018). Der Fokus verlagerte sich damit von allgemeinen Empfehlungen hin zu einer individualisierten und kontextabhängigen Betrachtung, die Trainingsstruktur, Leistungsniveau und sportartspezifische Anforderungen berücksichtigt (Hearris et al., 2018; Stellingwerff et al., 2019). Kohlenhydrate werden in diesem Zusammenhang als variabler Bestandteil der Trainings- und Ernährungsplanung verstanden (Burke & Hawley, 2018).

Die Entwicklung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport zeigt einen Wandel von standardisierten Strategien hin zu individualisierten und periodisierten Ansätzen. Während zunächst die Maximierung der Glykogenspeicher im Vordergrund stand, liegt der Fokus heute auf der gezielten Steuerung der Kohlenhydratverfügbarkeit zur Optimierung von Leistungsfähigkeit und trainingsinduzierten Anpassungen. Diese Entwicklung verdeutlicht die zunehmende Bedeutung einer differenzierten

Betrachtung von Zeitpunkt und Menge der Kohlenhydratzufuhr, deren spezifische Effekte auf Leistungsfähigkeit und Regeneration im weiteren Verlauf der Arbeit systematisch analysiert werden.

2.3 Kohlenhydrate – Aufbau, Funktion und Speicherung

Zur weiteren Einordnung der Kohlenhydratzufuhr im sportphysiologischen Kontext ist ein Verständnis der zugrunde liegenden metabolischen Prozesse erforderlich.

2.3.1 Chemischer Aufbau und Klassifikation

Kohlenhydrate gehören zu den organischen Verbindungen und bestehen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Sie werden entsprechend ihrer molekularen Struktur in Mono-, Di- und Polysaccharide eingeteilt. Monosaccharide und Disaccharide umfassen die einfachen Kohlenhydrate und bestehen aus einer beziehungsweise zwei Zuckereinheiten, darunter Glukose, Fruktose und Saccharose (Cummings & Stephen, 2007; Zeeman et al., 2010). Aufgrund ihrer geringen Molekülgröße werden sie rasch verdaut und stehen schnell für die Energieversorgung zur Verfügung.

Polysaccharide zählen zu den komplexen Kohlenhydraten und bestehen aus langen Ketten von Monosacchariden. Zu den wichtigsten Vertretern gehören Stärke in pflanzlichen Lebensmitteln sowie Glykogen als Speicherform im menschlichen Körper. Stärke setzt sich aus Amylose und Amylopektin zusammen, wobei die stärker verzweigte Struktur des Amylopektins eine schnellere enzymatische Spaltung und damit eine raschere Glukosebereitstellung ermöglicht (Zeeman et al., 2010). Im sportphysiologischen Kontext kommt dem Glykogen eine zentrale Bedeutung zu. Aufgrund seiner stark verzweigten Struktur kann es schnell mobilisiert werden und trägt damit wesentlich zur Energiebereitstellung bei intensiven Belastungen bei (Hawley & Leckey, 2015). Zudem besteht ein enger Zusammenhang zwischen der Glykogenverfügbarkeit und der Leistungsfähigkeit im Ausdauersport (Morton et al., 2009).

Neben ihrer Funktion als Energieträger erfüllen Kohlenhydrate weitere physiologische Aufgaben, etwa in der Regulation der Verdauung und als Substrat für das intestinale Mikrobiom (Mora-Flores et al., 2023). Für den Ausdauersport ist die Auswahl

geeigneter Kohlenhydratquellen relevant, um sowohl eine schnelle als auch eine anhaltende Energieverfügbarkeit sicherzustellen. Die zugrunde liegenden Verdauungs- und Absorptionsprozesse werden im folgenden Abschnitt erläutert.

2.3.2 Verdauung und Absorption

Damit Kohlenhydrate als Energiequelle genutzt werden können, müssen sie in Monosaccharide zerlegt werden. Die Verdauung beginnt im Mund durch die Speichelamylase, wird im Magen unterbrochen und setzt im Dünndarm fort, wo pankreatische Amylase sowie Enzyme der Dünndarmschleimhaut die Kohlenhydrate vollständig zu Monosacchariden abbauen (Röder et al., 2014). Die Aufnahme erfolgt über spezifische Transporter: Glukose und Galaktose werden über den natriumabhängigen Transporter SGLT1 aufgenommen, während Fruktose über GLUT5 transportiert wird. Anschließend gelangen die Monosaccharide überwiegend über GLUT2 in die Pfortader und zur Leber (Gorboulev et al., 2012; Kellett & Brot-Laroche, 2005).

In der Leber wird Glukose entweder gespeichert oder in den Blutkreislauf abgegeben, um Muskulatur und Gehirn mit Energie zu versorgen (Röder et al., 2014). Die Geschwindigkeit der Absorption hängt hierbei von der Struktur der Kohlenhydrate ab: Einfache Zucker werden schnell aufgenommen, während komplexe Kohlenhydrate langsamer verfügbar sind.

Im sportphysiologischen Kontext ist diese Dynamik von besonderer Bedeutung, da schnell verfügbare Kohlenhydrate eine unmittelbare Energiebereitstellung während intensiver Belastungen ermöglichen, während komplexe Kohlenhydrate eher zu einer stabileren Energieversorgung beitragen (Jeukendrup, 2017).

2.3.3 Speicherung: Leber- und Muskelglykogen

Überschüssige Glukose wird im Körper in Form von Glykogen gespeichert, einem stark verzweigten Polysaccharid, das als schnell mobilisierbarer Energiespeicher dient (Adeva-Andany et al., 2016). Die Speicherung erfolgt hauptsächlich in der Leber und in der Skelettmuskulatur, wobei beide Speicher unterschiedliche Funktionen erfüllen (Adeva-Andany et al., 2016; Murray & Rosenbloom, 2018).

2.3.3.1 Leberglykogen

Leberglykogen dient primär der Aufrechterhaltung eines stabilen Blutzuckerspiegels (Adeva-Andany et al., 2016; Murray & Rosenbloom, 2018). Nach der Nahrungsaufnahme wird Glukose insulinabhängig in der Leber gespeichert. Bei sinkendem Blutzuckerspiegel oder während körperlicher Belastung wird es wieder zu Glukose abgebaut und in den Blutkreislauf abgegeben (Adeva-Andany et al., 2016; Roach et al., 2012). Dadurch stellt es eine kontinuierliche Energieversorgung für das Gehirn sicher, was für die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit von zentraler Bedeutung ist (Murray & Rosenbloom, 2018; Podlogar & Wallis, 2022).

2.3.3.2 Muskelglykogen

Muskelglykogen dient als unmittelbare Energiequelle für die arbeitende Muskulatur und wird ausschließlich lokal genutzt (Adeva-Andany et al., 2016; Murray & Rosenbloom, 2018). Es wird während körperlicher Aktivität über die Glykolyse zur ATP-Bereitstellung herangezogen (Jeukendrup, 2017). Bei intensiven Belastungen stellt es eine zentrale Substratquelle dar. Ein niedriger Glykogengehalt ist mit vorzeitiger Ermüdung und reduzierter Leistungsfähigkeit assoziiert (Romijn et al., 1993). Der Füllstand des Muskelglykogens gilt daher als entscheidender Faktor für die Ausdauerleistung (Hawley & Leckey, 2015).

2.3.3.3 Regulation und sportliche Bedeutung

Die Glykogenspeicherung wird durch Ernährungszustand, hormonelle Prozesse und Trainingsbelastung beeinflusst (Roach et al., 2012). Nach körperlicher Belastung besteht eine erhöhte Kapazität zur Wiederauffüllung der Glykogenspeicher, wodurch die Grundlage für eine effiziente Regeneration geschaffen wird (Hawley & Leckey, 2015). Eine adäquate Glykogenverfügbarkeit ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit sowie für die Regeneration nach Belastung.

2.3.4 Hormonelle Regulation: Rolle von Insulin und Glukosetransportern

Die hormonelle Regulation stellt den zentralen Mechanismus dar, über den die Glukoseaufnahme in periphere Gewebe sowie die Glykogensynthese gesteuert werden (Roach et al., 2012). Insulin wirkt dabei als anaboles Hormon, indem es die Glukoseaufnahme in Muskel- und Fettzellen fördert und die Glykogenspeicherung unterstützt (Saltiel & Kahn, 2001).

Während körperlicher Aktivität erfolgt die Glukoseaufnahme zusätzlich insulinunabhängig über eine erhöhte Translokation von GLUT4 in die Zellmembran, wodurch die Energieversorgung der arbeitenden Muskulatur sichergestellt wird (Jeukendrup, 2017). Nach der Belastung ist die Insulinsensitivität erhöht, was die Glukoseaufnahme und die Glykogenresynthese beschleunigt (Roach et al., 2012). Diese Phase erhöhter Aufnahmefähigkeit wird häufig als „metabolic window“ bezeichnet (Burke et al., 2017). Eine zeitnahe Kohlenhydratzufuhr kann in diesem Zeitraum die Glykogenspeicherung signifikant steigern (Ivy et al., 1988). Damit bildet die hormonelle Regulation die physiologische Grundlage für die Wiederherstellung der Energiespeicher nach Belastung.

2.4 Formen der Kohlenhydratzufuhr: flüssig vs. fest

Die Form der Kohlenhydratzufuhr beeinflusst die Geschwindigkeit der Aufnahme, die glykämische Antwort sowie die praktische Umsetzbarkeit im sportlichen Kontext (Jeukendrup., 2014; Podlogar & Wallis, 2022). Im Ausdauersport wird zwischen flüssigen Kohlenhydratquellen wie Sportgetränken oder Gels und festen Quellen wie Riegeln oder fester Nahrung unterschieden (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2014). Die Wahl der Zufuhrform hängt vom Belastungskontext, der Intensität und Dauer der Belastung sowie von individuellen Faktoren wie der gastrointestinalen Verträglichkeit ab (Jeukendrup, 2011; Pfeiffer et al., 2012).

2.4.1 Resorptionsgeschwindigkeit und glykämische Antwort

Die physikalische Form der Kohlenhydratzufuhr beeinflusst die Geschwindigkeit der Magenentleerung und damit die intestinale Aufnahme sowie den Verlauf des

Blutzuckerspiegels. Flüssige Kohlenhydrate passieren den Magen in der Regel schneller und stehen daher rascher für die Energieversorgung zur Verfügung als feste Nahrung (Coyle, 1995; Jeukendrup, 2017). Die glykämische Antwort wird zusätzlich durch die Zusammensetzung der aufgenommenen Kohlenhydrate beeinflusst. Kohlenhydrate mit einem hohen glykämischen Index führen zu einem schnellen Anstieg der Blutglukose, während ballaststoff- oder fettreiche feste Mahlzeiten diesen Prozess verlangsamen können (Burke et al., 2017; Coyle et al., 1995). Eine rasche und kontinuierliche Glukoseverfügbarkeit ist während intensiver Belastungen leistungsrelevant, da sie den Blutzuckerspiegel stabilisiert und das Risiko einer belastungsinduzierten Hypoglykämie reduziert (Burke et al., 2011; Thomas et al., 2016;). Die Wirkung der jeweiligen Zufuhrform ist dabei stark kontextabhängig und wird durch Belastungsintensität, -dauer sowie individuelle Verträglichkeit beeinflusst (Jeukendrup, 2017).

2.4.2 Flüssige Kohlenhydratformen

Flüssige Kohlenhydratquellen wie Sportgetränke oder Gels ermöglichen eine schnelle Bereitstellung von Energie und können gleichzeitig zur Flüssigkeitszufuhr beitragen. Bei längeren oder intensiven Belastungen bieten sie daher praktische Vorteile (Jeukendrup, 2014).

Sportgels stellen eine konzentrierte Form der Kohlenhydratzufuhr dar und sind aufgrund ihrer einfachen Handhabung im Wettkampfkontext weit verbreitet.

Die Kombination unterschiedlicher Zuckerarten, beispielsweise Glukose und Fruktose, kann die intestinale Aufnahme steigern, da verschiedene Transportmechanismen genutzt werden (Currell & Jeukendrup, 2008). Dadurch lässt sich die exogene Kohlenhydratoxidation erhöhen und die Energieverfügbarkeit während der Belastung verbessern (Rowlands et al., 2015).

Darüber hinaus können flüssige Kohlenhydrate bei geeigneter Zusammensetzung gastrointestinale Beschwerden reduzieren, wenn Konzentration und Osmolalität individuell angepasst sind (Pfeiffer et al., 2012). Einschränkend ist zu berücksichtigen, dass flüssige Kohlenhydratquellen eine geringere Sättigungswirkung aufweisen und in der Regel weniger Mikronährstoffe enthalten.

2.4.3 Feste Kohlenhydratformen

Feste Kohlenhydratquellen wie Energieriegel oder kohlenhydratreiche Snacks werden vor allem bei längeren Belastungen sowie bei niedrigen bis moderaten Intensitäten eingesetzt. Aufgrund einer langsameren Magenentleerung erfolgt die Energieabgabe verzögert, was zu einer gleichmäßigeren Versorgung beitragen kann (Thomas et al., 2016; Jeukendrup, 2017).

Diese verzögerte Aufnahme führt zu einem stabileren Verlauf des Blutzuckerspiegels und kann bei moderaten Belastungsintensitäten vorteilhaft sein (Jeukendrup, 2017). Entsprechend weisen sportwissenschaftliche Empfehlungen darauf hin, dass feste Kohlenhydratquellen eine kontinuierliche Energiezufuhr unterstützen können (Thomas et al., 2016). Bei hohen Intensitäten kann die langsamere Magenentleerung jedoch die kurzfristige Energieverfügbarkeit einschränken. Zudem ist die Verträglichkeit individuell unterschiedlich. Studien weisen darauf hin, dass feste Kohlenhydratquellen bei intensiver Belastung häufiger mit gastrointestinalen Beschwerden assoziiert sind (Pfeiffer et al., 2012). In der Praxis wird daher häufig eine Kombination aus flüssigen und festen Kohlenhydratquellen genutzt, um sowohl eine schnelle als auch eine kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen (Jeukendrup, 2017).

2.4.4 Bedeutung für Leistungsfähigkeit und Regeneration

Die Form der Kohlenhydratzufuhr beeinflusst die Energieverfügbarkeit während der Belastung sowie die anschließende Regeneration. Flüssige Kohlenhydrate ermöglichen eine schnelle Glukosebereitstellung und sind bei unmittelbarem Energiebedarf vorteilhaft. Feste Kohlenhydratquellen ermöglichen hingegen eine länger anhaltende Energiezufuhr und können bei längeren Belastungen zur Stabilisierung des Blutzuckerspiegels beitragen (Jeukendrup, 2017). In der frühen Regenerationsphase kann eine schnelle Kohlenhydratzufuhr die initiale Glykogenresynthese unterstützen, während feste Kohlenhydratquellen im weiteren Verlauf zur Deckung des Gesamtbedarfs beitragen (Ivy et al., 1988). Aktuelle Übersichtsarbeiten zeigen, dass sowohl flüssige als auch feste Kohlenhydratquellen effektiv eingesetzt werden können, wobei individuelle Unterschiede sowie trainings- und wettkampfspezifische Anforderungen berücksichtigt werden sollten (Burke et al.,

2011; Jeukendrup, 2017). Die Wahl der Zufuhrform stellt damit einen praktischen Steuerungsfaktor dar, der die Umsetzung von Kohlenhydratstrategien im Hinblick auf Leistungsfähigkeit und Regeneration beeinflusst. Darauf aufbauend werden im folgenden Kapitel die zugrunde liegenden Prozesse des Kohlenhydratstoffwechsels und der Glykogenresynthese näher betrachtet.

2.5 Energiestoffwechsel im Ausdauersport

Der Energiestoffwechsel bildet die physiologische Grundlage jeder sportlichen Leistung. Im Ausdauersport ist die Fähigkeit entscheidend, Energie über längere Zeiträume effizient bereitzustellen, um die Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten (Hargreaves & Spriet, 2018; Thomas et al., 2016). Kohlenhydrate nehmen dabei eine zentrale Rolle ein, da sie eine schnelle und effektive ATP-Bereitstellung ermöglichen und bei höheren Belastungsintensitäten von Bedeutung sind (Jeukendrup, 2017). Ein gut funktionierender Kohlenhydratstoffwechsel ist somit essenziell, um sowohl moderate als auch intensive Belastungsphasen zu bewältigen (Thomas et al., 2016; Burke et al., 2017). Die folgenden Abschnitte beschreiben die grundlegenden Mechanismen der ATP-Produktion, die verschiedenen Wege der Kohlenhydratverwertung sowie deren Bedeutung bei unterschiedlichen Belastungsintensitäten.

2.5.1 Grundlagen der ATP-Produktion

Adenosintriphosphat (ATP) stellt die unmittelbare Energiequelle für muskuläre Kontraktionen dar und muss aufgrund der begrenzten intramuskulären Speicher kontinuierlich resynthetisiert werden (Gastin, 2001; Hargreaves & Spriet, 2018). Die vorhandenen Reserven reichen lediglich für wenige Sekunden intensiver Aktivität aus, sodass eine fortlaufende ATP-Neubildung notwendig ist (Jeukendrup, 2017).

Die ATP-Resynthese erfolgt über drei zentrale Energiesysteme: das Phosphagensystem, die anaerobe Glykolyse und die oxidative Phosphorylierung.

Diese Systeme arbeiten nicht isoliert, sondern tragen abhängig von Belastungsintensität und -dauer in unterschiedlichem Ausmaß zur Energieversorgung

bei (Gastin, 2001). Während das Phosphagensystem kurzfristige Belastungen dominiert und die anaerobe Glykolyse bei intensiven Belastungen an Bedeutung gewinnt, bildet die oxidative Energiegewinnung die Grundlage für längere Ausdauerleistungen.

Im Ausdauersport erfolgt die ATP-Bildung überwiegend über oxidative Prozesse in den Mitochondrien, wobei sowohl Kohlenhydrate als auch Fette als Substrate genutzt werden können. Kohlenhydrate ermöglichen dabei eine höhere ATP-Bildungsrate pro verbrauchter Sauerstoffmenge und sind daher bei höheren Intensitäten von Vorteil (van Loon et al., 2001; Spriet, 2014).

Regelmäßiges Ausdauertraining verbessert die Effizienz dieser Prozesse, unter anderem durch eine erhöhte mitochondriale Dichte und eine gesteigerte Aktivität oxidativer Enzyme (Jeukendrup, 2017). Gleichzeitig trägt eine ausreichende Kohlenhydratverfügbarkeit zur Aufrechterhaltung zentralnervöser Funktionen bei, da eine reduzierte Glukoseverfügbarkeit auch zentrale Ermüdungsprozesse beeinflussen kann (Meeusen et al., 2006). Sinkt die Kohlenhydratverfügbarkeit, erhöht sich die Fettoxidation, was jedoch mit einer geringeren ATP-Bildungsrate verbunden ist und die Leistungsfähigkeit bei höheren Intensitäten limitieren kann (Coyle, 1995).

2.5.2 Aerober und anaerober Kohlenhydratstoffwechsel

Die Energiebereitstellung aus Kohlenhydraten erfolgt über anaerobe und aerobe Stoffwechselwege, deren relative Bedeutung von der Belastungsintensität und der Sauerstoffverfügbarkeit abhängt. Beide Systeme arbeiten dabei eng zusammen und sichern die kontinuierliche ATP-Versorgung während körperlicher Aktivität (Gastin, 2001).

Der anaerobe Kohlenhydratstoffwechsel ermöglicht eine schnelle Energiegewinnung unter eingeschränkter Sauerstoffverfügbarkeit. Dabei wird Glukose über die Glykolyse zu Pyruvat abgebaut, das bei hoher Belastungsintensität überwiegend zu Laktat reduziert wird. Dieser Prozess liefert schnell ATP, ist jedoch in seiner Kapazität begrenzt und mit metabolischen Veränderungen verbunden, die die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen können (Gladden, 2004; Jeukendrup, 2017). Bei ausreichender Sauerstoffverfügbarkeit wird Pyruvat in den Mitochondrien weiterverarbeitet und vollständig oxidiert (Gastin, 2001; Hargreaves & Spriet, 2018). Der aerobe Stoffwechselweg ermöglicht eine höhere Energieausbeute und bildet die

Grundlage für eine effiziente Energiebereitstellung während längerer Ausdauerbelastungen (Gastin, 2001; Jeukendrup, 2017).

In der sportpraktischen Realität überlappen sich beide Systeme kontinuierlich. Während bei steigender Intensität der Anteil anaerober Prozesse zunimmt, dominiert bei moderaten Intensitäten und längeren Belastungen der aerobe Stoffwechsel. Diese dynamische Anpassung gewährleistet eine stabile Energieversorgung über unterschiedliche Belastungsphasen hinweg (Gastin, 2001).

2.5.3 Beitrag der Kohlenhydrate bei unterschiedlichen Belastungsintensitäten

Der Beitrag der Kohlenhydrate zur Energiebereitstellung variiert in Abhängigkeit von Belastungsintensität und -dauer. Während bei niedrigen Intensitäten überwiegend Fette oxidiert werden, steigt der Anteil der Kohlenhydratoxidation mit zunehmender Intensität deutlich an. Dieses Verhältnis wird durch das Crossover-Konzept beschrieben (Brooks & Mercier, 1994). Bei niedrigen Intensitäten erfolgt die Energieversorgung primär über Fette, da die Sauerstoffverfügbarkeit hoch ist und der Energiebedarf pro Zeiteinheit vergleichsweise gering bleibt (van Loon et al., 2001). Mit steigender Intensität nimmt die Kohlenhydratoxidation zu, bedingt durch einen erhöhten ATP-Bedarf, die Rekrutierung schnell kontrahierender Muskelfasern sowie hormonelle Veränderungen, die die Glykogenolyse fördern (Romijn et al., 1993). Bei hohen Intensitäten stellen Kohlenhydrate die dominante Energiequelle dar, da sie eine schnelle ATP-Bildung ermöglichen. Die Fettoxidation ist in diesem Bereich eingeschränkt, da sie eine höhere Sauerstoffverfügbarkeit erfordert und langsamer abläuft (Hawley & Leckey, 2015; Spriet, 2014). Mit zunehmender Belastungsdauer und abnehmenden Glykogenspeichern verschiebt sich die Energiebereitstellung wieder stärker in Richtung Fettoxidation. Diese Anpassung ermöglicht eine längerfristige Energieversorgung, geht jedoch mit einer Reduktion der maximal möglichen Belastungsintensität einher (Romijn et al., 1993).

2.5.4 Limitierende Faktoren: Glykogendepletion („Hitting the Wall“)

Die Erschöpfung der Glykogenspeicher stellt einen entscheidenden limitierenden Faktor der Ausdauerleistung dar (Philp et al., 2012; Thomas et al., 2016). Dieses Phänomen, häufig als „Hitting the Wall“ bezeichnet, tritt auf, wenn die verfügbaren Kohlenhydratspeicher weitgehend entleert sind und der Organismus verstärkt auf die Fettoxidation angewiesen ist (Coyle, 1995; Hargreaves & Spriet, 2018).

Da Fette im Vergleich zu Kohlenhydraten eine geringere ATP-Bildungsrate ermöglichen, kommt es in der Folge zu einem deutlichen Leistungsabfall (Hawley & Leckey, 2015; Spriet, 2014). Trainierte Ausdauerathlet:innen verfügen typischerweise über etwa 400–600 g Glykogen in der Muskulatur sowie 80–100 g in der Leber (Burke & Hawley, 2018). Diese Speicher können abhängig von Intensität und Trainingszustand bereits nach 90–180 Minuten submaximaler Belastung weitgehend erschöpft sein (Coyle et al., 1986). Mit sinkenden Glykogenspeichern reduziert sich die maximale Kohlenhydratoxidation, wodurch die Aufrechterhaltung höherer Intensitäten eingeschränkt wird (Spriet, 2014; Jeukendrup, 2017). Typische Folgen sind eine ausgeprägte Ermüdung, reduzierte Muskelkraft sowie ein subjektives Leistungsabfallgefühl (Coyle, 1995). Neben der muskulären Komponente spielt auch die zentrale Ermüdung eine Rolle. Sinkt der Blutzuckerspiegel infolge reduzierter Leberglykogenspeicher, kann die Glukoseversorgung des Gehirns beeinträchtigt werden, was sich negativ auf kognitive Funktionen und motorische Steuerung auswirkt (Meeusen et al., 2006). Aktuelle Übersichtsarbeiten bestätigen, dass eine ausreichende Kohlenhydratverfügbarkeit wesentlich dazu beiträgt, diese Effekte hinauszuzögern (Stellingwerff et al., 2019). Der Trainingszustand beeinflusst maßgeblich die Geschwindigkeit der Glykogendepletion. Regelmäßiges Ausdauertraining erhöht die Speicherkapazität, verbessert die Fettoxidation und steigert die Effizienz der Energiegewinnung (Impey et al., 2018). Dadurch kann die Leistungsfähigkeit über längere Zeiträume aufrechterhalten werden.

Insgesamt stellt die Glykogendepletion einen entscheidenden limitierenden Faktor der Ausdauerleistung dar. Ein Verständnis dieser Mechanismen bildet die Grundlage für Strategien, die darauf abzielen, die Kohlenhydratverfügbarkeit gezielt zu steuern und leistungsrelevante Einbrüche zu vermeiden, Aspekte, die im weiteren Verlauf der Arbeit im Hinblick auf Timing und Dosis der Kohlenhydratzufuhr vertieft werden.

2.6 Regeneration im Kontext von Ausdauertraining und Kohlenhydraten

Die Regeneration nach Ausdauerbelastungen stellt einen zentralen Bestandteil leistungsorientierten Trainings dar. Ein entscheidender Faktor ist dabei die Wiederauffüllung der muskulären und hepatischen Glykogenspeicher, da deren Verfügbarkeit eng mit der Leistungsfähigkeit, der Ermüdungsresistenz sowie trainingsinduzierten Anpassungsprozessen verknüpft ist (Jensen & Richter, 2012; Murray & Rosenbloom, 2018). Eine adäquate Kohlenhydratzufuhr beeinflusst somit maßgeblich die Geschwindigkeit der Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit nach intensiven oder lang andauernden Belastungen (Burke et al., 2017).

Auf dieser Grundlage kommt den physiologischen Prozessen der Glykogensynthese nach Belastung eine zentrale Bedeutung zu. Die folgenden Abschnitte beleuchten diese Prozesse, die Bedeutung des Timings, empfohlene Dosierungen sowie deren praktische Umsetzung im Trainingsalltag.

2.6.1 Prozesse der Glykogensynthese nach Belastung

Nach intensiven Ausdauerbelastungen stellt die Wiederauffüllung der Glykogenspeicher einen zentralen Regenerationsprozess dar. Eine unvollständige Resynthese kann sowohl die kurzfristige Leistungsfähigkeit als auch trainingsinduzierte Anpassungen beeinträchtigen (Jensen & Richter, 2012; Burke et al., 2017).

Dabei spielt der Grad der vorangegangenen Glykogendepletion eine entscheidende Rolle, da mit zunehmender Entleerung die Aktivität der beteiligten Transport- und Enzymsysteme ansteigt (Jensen & Richter, 2012; Murray & Rosenbloom, 2018). Im Anschluss daran lässt sich die Glykogenresynthese in zwei funktionell unterschiedliche Phasen unterteilen. In der frühen Phase unmittelbar nach Belastungsende ist die Glukoseaufnahmefähigkeit der Muskulatur erhöht, wodurch die Wiederauffüllung besonders effizient erfolgt. In der anschließenden Phase bleibt die Insulinsensitivität erhöht, was eine kontinuierliche, jedoch langsamere Glykogensynthese ermöglicht (Ivy et al., 1988; Jensen & Richter, 2012). Die Geschwindigkeit der Glykogenresynthese wird durch mehrere Faktoren bestimmt. Neben dem Ausmaß der Glykogendepletion spielen eine erhöhte Glukoseverfügbarkeit, ein gesteigerter Muskelblutfluss sowie

eine hohe Aktivität der Glykogensynthese eine zentrale Rolle (Burke et al., 2017; Murray & Rosenbloom, 2018). Neben diesen Einflussfaktoren ist auch die funktionelle Differenzierung der Glykogenspeicher zu berücksichtigen. Muskel- und Leberglykogen erfüllen unterschiedliche Funktionen im Energiestoffwechsel. Während Muskelglykogen der lokalen Energieversorgung dient, trägt Leberglykogen zur Stabilisierung des Blutzuckerspiegels bei. Eine vollständige Regeneration erfordert daher die Wiederauffüllung beider Speicher (Murray & Rosenbloom, 2018; Burke et al., 2017). Die kombinierte Aufnahme von Glukose und Fruktose kann dabei die parallele Auffüllung beider Speicher unterstützen (Burke et al., 2017). Unter optimalen Bedingungen erfolgt die Glykogenresynthese mit einer Rate von etwa 5–6 mmol/kg Trockenmasse pro Stunde, sodass eine weitgehende Wiederauffüllung innerhalb von etwa 24 Stunden möglich ist (Burke et al., 2017). Verzögerungen oder eine unzureichende Kohlenhydratzufuhr verlangsamen diesen Prozess deutlich (Murray & Rosenbloom, 2018).

2.6.2 Bedeutung des Timings („Glykogen-Window“)

Aufbauend auf den beschriebenen physiologischen Mechanismen gewinnt der zeitliche Aspekt der Kohlenhydratzufuhr besondere Bedeutung. Das Konzept des „Glykogen-Window“ beschreibt die Phase unmittelbar nach Belastungsende, in der die Kohlenhydrataufnahme besonders effizient erfolgt (Ivy et al., 1988). Eine zeitnahe Kohlenhydratzufuhr kann die Geschwindigkeit der Glykogenresynthese signifikant erhöhen, während Verzögerungen die Wiederauffüllung der Speicher deutlich verlangsamen (Burke et al., 2017). Innerhalb der ersten 30–60 Minuten nach Belastungsende werden die höchsten Resyntheseraten beobachtet.

Die praktische Bedeutung dieses Zeitfensters ist vor allem bei kurzen Regenerationsintervallen relevant, da eine schnelle Wiederauffüllung der Speicher die Leistungsfähigkeit in nachfolgenden Trainingseinheiten beeinflusst. Bei längeren Erholungsphasen tritt hingegen die gesamte Kohlenhydratzufuhr über den Tag hinweg stärker in den Vordergrund (Burke et al., 2017; Murray & Rosenbloom, 2018).

Vor diesem Hintergrund ist das „Glykogen-Window“ weniger als starres Zeitfenster, sondern vielmehr als kontextabhängiges Prinzip zu verstehen, dessen Relevanz vom Trainingsumfang und den Regenerationszeiten abhängt.

2.6.3 Empfohlene Kohlenhydratzufuhr in der frühen Regenerationsphase

Neben dem Timing stellt auch die zugeführte Kohlenhydratmenge einen entscheidenden Faktor für die Glykogenresynthese dar. Die optimale Kohlenhydratzufuhr in der frühen Regenerationsphase orientiert sich an der maximalen Kapazität der Glykogenresynthese. Eine Aufnahme von etwa 1,0–1,2 g Kohlenhydraten pro Kilogramm Körpergewicht pro Stunde in den ersten Stunden nach Belastungsende wird als effektiv angesehen (Burke et al., 2017).

Diese Empfehlung basiert auf der begrenzten Aufnahme- und Verwertungskapazität der Muskelzellen, wodurch höhere Zufuhrmengen keinen zusätzlichen Nutzen bieten (Thomas et al., 2016). Besonders relevant ist diese Strategie in den ersten vier bis sechs Stunden nach Belastungsende (Burke et al., 2017).

Für die praktische Umsetzung ist weniger die exakte Verteilung entscheidend als vielmehr die Erreichung der Gesamtmenge. Eine regelmäßige Zufuhr über kleinere Portionen kann dabei zur Aufrechterhaltung einer konstanten Glukoseverfügbarkeit beitragen (Burke et al., 2017).

2.6.4 Praktische Umsetzung im Trainingsalltag

Auf Basis dieser Empfehlungen ergibt sich die Notwendigkeit einer praxisnahen Umsetzung im Trainingsalltag. Die effektive Umsetzung der Kohlenhydratzufuhr im Trainingsalltag erfordert die Auswahl geeigneter und gut verträglicher Kohlenhydratquellen. In der frühen Regenerationsphase sind leicht verdauliche Formen vorteilhaft, da sie eine schnelle Aufnahme ermöglichen (Burke & Hawley, 2018; Thomas et al., 2016). Bei kurzen Regenerationsintervallen zwischen zwei Trainingseinheiten kann eine regelmäßige Zufuhr kleinerer Mengen dazu beitragen, die Glukoseverfügbarkeit konstant zu halten und die Glykogenresynthese zu unterstützen (Burke et al., 2017). Bei längeren Erholungsphasen ist hingegen die gesamte Kohlenhydratzufuhr über den Tag hinweg entscheidend (Murray & Rosenbloom, 2018). Die Auswahl der Kohlenhydratquellen sollte individuell angepasst werden, da Unterschiede in der gastrointestinalen Verträglichkeit sowie praktische Aspekte des Trainingsalltags eine wichtige Rolle spielen (Jeukendrup, 2017). Eine

strukturierte Kohlenhydratzufuhr trägt somit wesentlich zur Optimierung der Regeneration und zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit bei.

2.7 Timing und Dosis der Kohlenhydratzufuhr

Timing und Menge der Kohlenhydratzufuhr gelten als zentrale ernährungsstrategische Faktoren zur Sicherstellung einer optimalen Energieverfügbarkeit im Ausdauersport (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2017). Im Unterschied zu den in Kapitel 2.6 beschriebenen Prozessen der Kohlenhydratzufuhr nach der Belastung richtet sich der Fokus dieses Abschnitts auf die Phase vor und während einer Trainingseinheit oder eines Wettkampfes. Diese Zeitpunkte beeinflussen unterschiedliche physiologische Mechanismen und bestimmen, wie effektiv Muskel- und Leberglykogen genutzt oder geschont werden können (Jeukendrup, 2017). Während klassische Ansätze vor allem die Aufrechterhaltung hoher Glykogenspeicher als entscheidenden Leistungsfaktor betonen (Jeukendrup, 2017), belegen neuere Arbeiten, dass sowohl das Timing als auch die kontextabhängige Dosis der Kohlenhydratzufuhr eine wesentliche Rolle spielen (Burke & Hawley, 2018). Konzepte wie „fuel for the work required“ erweitern diese Perspektive, indem sie die Kohlenhydratzufuhr nicht nur als energetische Grundlage, sondern auch als Instrument zur Beeinflussung trainingsadaptiver Prozesse verstehen (Impey et al., 2018).

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden die Kohlenhydrataufnahme vor und während der Belastung betrachtet sowie deren praktische Umsetzung im Trainingsalltag dargestellt.

2.7.1 Kohlenhydrataufnahme vor der Belastung

Die gezielte Kohlenhydrataufnahme vor einer Ausdauerbelastung dient in erster Linie der Maximierung der muskulären und hepatischen Glykogenspeicher und trägt damit wesentlich zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit bei (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2017). Die Ausgangshöhe dieser Speicher beeinflusst maßgeblich, wie lange eine vorgegebene Belastungsintensität aufrechterhalten werden kann (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2017). In Ausdauersportarten mit längerer

Belastungsdauer ist ein hoher Glykogenstatus vor Belastungsbeginn entscheidend für die Ermüdungsresistenz und den Erhalt der Zielintensität (Jeukendrup, 2017).

Die Kohlenhydratzufuhr in den Stunden und Tagen vor Training oder Wettkampf zielt primär auf eine möglichst vollständige Auffüllung der Speicher ab (Bergström & Hultman, 1967; Jeukendrup, 2017). Niedrige Glykogenspeicher gehen hingegen mit einer früher einsetzenden Ermüdung und einer reduzierten Fähigkeit einher, höhere Intensitäten über längere Zeit aufrechtzuerhalten (Hawley & Burke, 2010). Darüber hinaus weist die Literatur darauf hin, dass Glykogen nicht nur als Energiesubstrat, sondern auch als regulatorisches Signal metabolische Anpassungsprozesse beeinflusst (Philp et al., 2012).

Die Höhe der Glykogenspeicher wird wesentlich durch die Kohlenhydratzufuhr in den letzten 24 Stunden vor der Belastung bestimmt (Burke & Hawley, 2018). Entsprechend werden je nach Belastungsdauer und -intensität tägliche Zufuhrmengen von etwa 7–12 g Kohlenhydraten pro Kilogramm Körpergewicht empfohlen (Thomas et al., 2016). Für moderat-intensive Belastungen können bereits geringere Mengen von etwa 5–7 g/kg KG pro Tag ausreichend sein (Jeukendrup, 2017). Die optimale Zufuhr ist somit vom Trainingsziel und Belastungsprofil abhängig.

Zusätzlich kann eine kohlenhydratreiche Mahlzeit etwa drei bis vier Stunden vor Belastungsbeginn den metabolischen Ausgangszustand günstig beeinflussen, da sie eine weitgehende Magenentleerung und eine stabile Blutzuckerregulation zu Belastungsbeginn ermöglicht (Burke & Hawley, 2018; Thomas et al., 2016). Eine weitere Kohlenhydratzufuhr 30–60 Minuten vor Belastungsbeginn kann bei morgendlichen Einheiten die Leberglykogenspeicher stabilisieren und die Glukoseverfügbarkeit im Blut erhöhen (Jeukendrup, 2017). Frühere Hinweise auf eine mögliche reaktive Hypoglykämie werden in neueren Arbeiten bei trainierten Ausdauersportler:innen überwiegend nicht als leistungsrelevant bestätigt (Febbraio et al., 2000; Jeukendrup, 2011).

Für längere Ausdauerbelastungen von mehr als 90 Minuten werden in den letzten 36–48 Stunden vor Belastungsbeginn Zufuhrmengen von etwa 10–12 g Kohlenhydraten pro Kilogramm Körpergewicht empfohlen, um eine möglichst hohe Speicherfüllung zu erreichen (Burke & Hawley, 2018). Die praktische Umsetzung sollte jedoch stets an die individuelle Verträglichkeit angepasst werden, da ballaststoff- oder fettreiche Mahlzeiten das Risiko gastrointestinaler Beschwerden erhöhen können (Burke & Hawley, 2018). Eine personalisierte Gestaltung der Ernährung vor der Belastung ist

daher erforderlich, um leistungsphysiologische Anforderungen und individuelle Toleranz gleichermaßen zu berücksichtigen.

2.7.2 Kohlenhydrataufnahme während der Belastung

Die Kohlenhydratzufuhr während einer Ausdauerbelastung dient dazu, die Energieverfügbarkeit aufrechtzuerhalten, die Entleerung der Glykogenspeicher zu verlangsamen und zentralnervösen Ermüdungsprozessen entgegenzuwirken (Jeukendrup, 2017). Exogen zugeführte Kohlenhydrate tragen zur Stabilisierung des Blutzuckerspiegels bei und können die Belastungsdauer bei längeren Ausdauerleistungen verlängern (Jeukendrup, 2017). Gleichzeitig schafft eine geringere Glykogenverarmung günstigere Voraussetzungen für die nachfolgende Regeneration (Burke et al., 2011). Mit zunehmender Belastungsdauer sinkt die Muskelglykogenkonzentration kontinuierlich, wodurch sich die Energiebereitstellung schrittweise in Richtung Fettoxidation verschiebt (Jeukendrup, 2017). Da die maximale ATP-Bildungsrate aus Fetten begrenzt ist, kann dies bei höheren Intensitäten mit einer reduzierten Leistungsfähigkeit einhergehen. Eine Kohlenhydratzufuhr während der Belastung verzögert diese Entwicklung und unterstützt damit die Aufrechterhaltung der Leistung (Jeukendrup, 2017). Zusätzlich können Kohlenhydrate auch zentralnervöse Effekte entfalten. Studien zeigen, dass bereits ein kohlenhydrathaltiges Mundspülen bei kürzeren, hochintensiven Belastungen leistungssteigernde Effekte haben kann, was auf die Aktivierung zentraler Belohnungs- und Motivationszentren zurückgeführt wird (Rollo et al., 2011).

Die Empfehlungen zur Kohlenhydratzufuhr während der Belastung orientieren sich vor allem an Dauer und Intensität. Bei Belastungen bis etwa 60 Minuten ist bei ausreichend gefüllten Ausgangsspeichern in der Regel keine zusätzliche Zufuhr erforderlich (Burke et al., 2017; Thomas et al., 2016). Bei Belastungen zwischen 60–120 Minuten werden etwa 30–60 g Kohlenhydrate pro Stunde empfohlen (Thomas et al., 2016). Bei sehr langen Belastungen von mehr als 2,5 Stunden können Zufuhrmengen von bis zu 90 g pro Stunde leistungsfördernd sein (Currell & Jeukendrup, 2008; Rowlands et al., 2015). Neuere Arbeiten berichten, dass die Kombination unterschiedlicher Zuckerarten, Glukose und Fruktose, die intestinale Absorptionskapazität erhöht und die Oxidationsrate exogener Kohlenhydrate steigern kann (Podlogar & Wallis, 2022).

Durch die gleichzeitige Nutzung verschiedener Transportmechanismen sind damit höhere Aufnahmeraten möglich als bei der alleinigen Zufuhr von Glukose (Currell & Jeukendrup, 2008; Podlogar & Wallis, 2022). Auch der Zeitpunkt der ersten Kohlenhydratzufuhr während der Belastung ist relevant. Eine frühe Aufnahme innerhalb der ersten 20–30 Minuten kann zu einer stabileren Blutzuckerkonzentration beitragen und eine frühzeitige Glykogendepletion verzögern (Pfeiffer et al., 2010; Jeukendrup, 2011). Bei hohen Zufuhrmengen kann eine frühzeitige und gleichmäßige Verteilung zudem die gastrointestinale Belastung reduzieren (Podlogar & Wallis, 2022). Die Auswahl geeigneter Kohlenhydratquellen hängt von der gewünschten Aufnahmerate und der individuellen Verträglichkeit ab. Flüssige Kohlenhydratquellen mit einer Konzentration von etwa 6–8 % werden in der Regel gut toleriert und passieren den Magen schnell (Jeukendrup, 2017). Gels in Kombination mit Wasser sowie bei sehr langen Belastungen auch feste Nahrung können sinnvolle Alternativen darstellen. Darüber hinaus lässt sich die intestinale Aufnahmefähigkeit durch ein gezieltes gastrointestinales Training verbessern, wodurch sowohl die Transportkapazität als auch die Verträglichkeit höherer Kohlenhydratzufuhrmengen gesteigert werden können (Jeukendrup, 2017).

2.7.3 Praktische Umsetzung im Trainingsalltag

Die Umsetzung der Kohlenhydratzufuhr vor und während Ausdauerbelastungen erfordert die Anpassung wissenschaftlicher Empfehlungen an individuelle und sportartspezifische Anforderungen. Während Timing und Dosis die theoretische Grundlage bilden, entscheidet im Trainingsalltag vor allem die Integration der Strategie in bestehende Routinen über ihre Wirksamkeit (Burke & Hawley, 2018).

Für die Umsetzung ist eine an Belastungsdauer und Intensität angepasste Auswahl geeigneter Kohlenhydratquellen entscheidend. Leicht verdauliche Formen wie Sportgetränke oder Gels haben sich bei Einheiten zwischen 60–120 Minuten bewährt, da sie eine schnelle Resorption ermöglichen und die gastrointestinale Belastung gering halten (Thomas et al., 2016). Bei sehr langen Belastungen kann ergänzend auch feste Nahrung eingesetzt werden, um die Energiezufuhr über längere Zeit praktikabel aufrechtzuerhalten.

Ein zentraler Bestandteil der praktischen Umsetzung ist die individuelle Anpassung an die gastrointestinale Toleranz. Hohe Aufnahmeraten von 60–90 g Kohlenhydraten pro Stunde erfordern in der Regel eine schrittweise Gewöhnung, um Beschwerden während der Belastung zu vermeiden (Jeukendrup, 2017). Ein strukturiertes gastrointestinales Training kann hierbei die Verträglichkeit und die intestinale Transportkapazität verbessern (Jeukendrup, 2017). Dies gilt bei der Verwendung dualer Kohlenhydratmischungen, die zwar höhere Oxidationsraten ermöglichen, gleichzeitig aber auch eine erhöhte Belastung des Verdauungssystems darstellen können (Podlogar & Wallis, 2022).

Zusammenfassend erfordert die praktische Umsetzung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauertraining eine Kombination aus wissenschaftlich fundierten Empfehlungen, individueller Verträglichkeit und sportartspezifischer Anpassung. Eine frühzeitige Planung, das systematische Testen unterschiedlicher Kohlenhydratquellen sowie eine progressive Anpassung an höhere Zufuhrmengen bilden die Grundlage für eine zuverlässige Anwendung unter realen Trainings- und Wettkampfbedingungen. Auf diese Weise lassen sich sowohl die akute Leistungsfähigkeit als auch die Voraussetzungen für die anschließende Regeneration gezielt unterstützen.

2.8 Ernährungskonzepte im Ausdauersport

Ernährungskonzepte im Ausdauersport zielen darauf ab, die Kohlenhydratverfügbarkeit gezielt an Trainingsanforderungen, Belastungsstruktur und Regenerationsbedarf anzupassen. Während in Abschnitt 2.7 die akuten Effekte von Timing und Dosierung der Kohlenhydratzufuhr im direkten Zusammenhang mit einer Belastung betrachtet wurden, ordnet dieses Kapitel diese Aspekte in übergeordnete strategische Ansätze ein (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2017). Grundsätzlich lassen sich Konzepte unterscheiden, die eine hohe Kohlenhydratverfügbarkeit sicherstellen, und solche, die gezielt mit reduzierten Kohlenhydratspeichern arbeiten. Beide Ansätze verfolgen unterschiedliche physiologische Zielsetzungen und werden abhängig von Trainingsphase, Belastungsintensität und individuellen Anforderungen eingesetzt (Burke & Hawley, 2018; Impey et al., 2018).

2.8.1 High-Carbohydrate-Strategien

High-Carbohydrate-Strategien zählen zu den etablierten Ernährungskonzepten im Ausdauersport und zielen auf die Sicherstellung einer hohen Kohlenhydratverfügbarkeit ab. Eine ausreichende Zufuhr unterstützt die Auffüllung der Muskel- und Leberglykogenspeicher und trägt wesentlich zur Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit bei intensiven oder umfangreichen Belastungen bei (Burke & Hawley, 2018; Jeukendrup, 2017). Für sportlich aktive Personen mit moderatem bis hohem Trainingsumfang werden tägliche Zufuhrmengen von etwa 6–10 g Kohlenhydraten pro Kilogramm Körpergewicht empfohlen, während in intensiven Trainingsphasen oder vor Wettkämpfen kurzfristig auch höhere Mengen von bis zu 12 g/kg/Tag sinnvoll sein können (Thomas et al., 2016).

Neben der Leistungsstabilisierung unterstützen High-Carbohydrate-Strategien auch die Regeneration. Eine Kohlenhydrataufnahme von etwa 1,0–1,2 g/kg Körpergewicht in der frühen Erholungsphase kann die Glykogenresynthese beschleunigen und die Vorbereitung auf nachfolgende Belastungen verbessern (Burke et al., 2017). Gleichzeitig wird die Kohlenhydratzufuhr im Rahmen moderner Ansätze zunehmend an die jeweiligen Trainingsanforderungen angepasst. Das Prinzip „fuel for the work required“ beschreibt hierbei eine situationsabhängige Steuerung der Kohlenhydratverfügbarkeit, wodurch eine flexible und kontextorientierte Ernährungsstrategie ermöglicht wird (Burke & Hawley, 2018; Impey et al., 2018).

2.8.2 Klassisches Carbo-Loading

Eine spezifische Ausprägung der High-Carbohydrate-Strategien stellt das CarboLoading dar, das zur Vorbereitung auf lange Ausdauerbelastungen eingesetzt wird. Ziel ist die maximale Auffüllung der muskulären Glykogenspeicher, um leistungslimitierende Effekte einer vorzeitigen Entleerung zu vermeiden (Burke et al., 2011).

Moderne Protokolle empfehlen bei Belastungen von mehr als 90 Minuten eine Kohlenhydratzufuhr von etwa 10–12 g/kg Körpergewicht pro Tag über einen Zeitraum von 36–72 Stunden, kombiniert mit einer Reduktion des Trainingsvolumens (Thomas

et al., 2016). Studien zeigen, dass dadurch Leistungsverbesserungen im Bereich von etwa 2–3 % erzielt werden können (Hawley & Burke, 2010).

Im Gegensatz zu früheren Ansätzen ist eine vorherige Glykogenentleerung nicht mehr erforderlich. Eine Kombination aus erhöhter Kohlenhydratzufuhr und reduziertem Trainingsumfang führt zu vergleichbaren Effekten bei gleichzeitig besserer Verträglichkeit (Burke et al., 2011). Dennoch sollte Carbo-Loading gezielt eingesetzt werden, da hohe Kohlenhydratzufuhrmengen kurzfristig mit gastrointestinalen Beschwerden oder einer erhöhten Wasserbindung einhergehen können (Burke et al., 2017).

2.8.3 Train-Low-Strategien

Neben Strategien mit hoher Kohlenhydratverfügbarkeit wurden vermehrt Ansätze untersucht, bei denen Trainingseinheiten gezielt unter Bedingungen niedriger Kohlenhydratspeicher durchgeführt werden. Diese sogenannten Train-Low-Strategien zielen darauf ab, metabolische Anpassungen zu fördern, die mit einer verbesserten mitochondrialen Funktion und einer erhöhten Fettoxidation assoziiert sind.

Zu den häufig beschriebenen Varianten zählen Trainingseinheiten mit reduzierten Glykogenspeichern („train low“), das „sleep-low“-Modell mit abendlicher Belastung und anschließender kohlenhydratarmer Ernährung sowie das „twice-a-day“-Modell mit zwei Einheiten in kurzer zeitlicher Abfolge ohne zwischenzeitliche Kohlenhydratzufuhr (Hansen et al., 2005; Impey et al., 2018).

Trotz potenzieller Vorteile für trainingsinduzierte Anpassungen zeigen Studien, dass eine dauerhaft niedrige Kohlenhydratverfügbarkeit die Trainingsqualität sowie die Regeneration beeinträchtigen kann (Morton et al., 2009). Daher werden Train-Low Ansätze heute überwiegend im Rahmen periodisierter Ernährungsstrategien eingesetzt, bei denen Phasen hoher und niedriger Kohlenhydratverfügbarkeit gezielt kombiniert werden (Hearris et al., 2018; Stellingwerff et al., 2019).

2.8.4 Einordnung im Kontext der vorliegenden Arbeit

Die dargestellten Ernährungskonzepte verdeutlichen, dass die Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern stets im Zusammenhang mit Belastungsanforderungen, Regenerationsbedarf und individueller Zielsetzung steht. Während langfristige Strategien wie Carbo-Loading oder periodisierte Kohlenhydratverfügbarkeit vor allem auf die Vorbereitung von Belastungen und die Steuerung trainingsinduzierter Anpassungen abzielen, richtet sich der Fokus der vorliegenden Arbeit auf die akuten Effekte der Kohlenhydratzufuhr im direkten zeitlichen Zusammenhang mit einzelnen Ausdauerbelastungen.

Im Zentrum steht dabei die Frage, inwiefern unterschiedliche Zeitpunkte und Dosierungen der Kohlenhydrataufnahme die sportliche Leistungsfähigkeit sowie die Regeneration beeinflussen. Die in diesem Kapitel dargestellten theoretischen Grundlagen zeigen, dass insbesondere die Verfügbarkeit von Muskel- und Leberglykogen, die Form der Kohlenhydratzufuhr sowie deren Timing und Dosierung zentrale Einflussgrößen für die Energiebereitstellung während der Belastung und die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit nach der Belastung darstellen. Gleichzeitig wird deutlich, dass diese Effekte in Abhängigkeit vom Belastungskontext und individuellen Voraussetzungen zu betrachten sind.

Damit bildet das vorliegende Kapitel die theoretische Grundlage für die weitere Untersuchung der Forschungsfrage. Im folgenden Kapitel wird das methodische Vorgehen dargestellt, mit dem die relevante Literatur systematisch identifiziert, ausgewählt und im Hinblick auf den Einfluss von Timing und Dosierung der Kohlenhydratzufuhr auf Leistungsfähigkeit und Regeneration ausgewertet wurde.

3. Methodikteil

Aufbauend auf den in Kapitel 2 dargestellten theoretischen Grundlagen beschreibt dieses Kapitel das methodische Vorgehen der vorliegenden Arbeit und legt dar, auf welcher Grundlage die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt. Zunächst wird die Wahl des systematischen Reviews als Studiendesign begründet. Anschließend werden die Forschungsfrage und Zielsetzung sowie die Ein- und Ausschlusskriterien nach dem PICO-Schema dargestellt.

Darauf aufbauend werden die Durchführung der systematischen Literaturrecherche, der Studiauswahlprozess sowie die methodische Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Studien erläutert. Ziel des Kapitels ist es, die Identifikation, Auswahl und Bewertung der zugrunde liegenden Evidenz transparent und nachvollziehbar darzustellen und damit die methodische Grundlage für die anschließende Ergebnisdarstellung zu schaffen.

3.1 Systematischer Review

Die vorliegende Arbeit stellt einen systematischen Review dar, der gemäß den PRISMA-2020-Leitlinien (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and MetaAnalyses) durchgeführt wurde, um eine transparente und strukturierte Identifikation, Auswahl und Auswertung relevanter Studien sicherzustellen (Page et al., 2021). Der Review folgte einem standardisierten und nachvollziehbaren methodischen Vorgehen mit vordefinierten Ein- und Ausschlusskriterien sowie einem systematischen Screening-Prozess (Page et al., 2021). Systematische Reviews zeichnen sich durch ein strukturiertes und transparentes Vorgehen aus, bei dem Studien zu einer klar definierten Fragestellung systematisch identifiziert und ausgewertet werden (Siddaway et al., 2019). Ziel war es, die verfügbare Evidenz zur Fragestellung strukturiert zusammenzuführen und kritisch zu bewerten. Die Wahl dieses Studiendesigns ist insbesondere vor dem Hintergrund einer umfangreichen und heterogenen Studienlage im Bereich sporternährungsbezogener Interventionen sinnvoll. Studien zur Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport unterscheiden sich hinsichtlich Belastungsform, Interventionsgestaltung, Dosierung, Timing sowie der verwendeten Leistungs- und

Regenerationsparameter, was die Vergleichbarkeit einzelner Untersuchungen einschränkt.

Durch die systematische Zusammenführung der vorhandenen Forschung können Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Studien herausgearbeitet und die Evidenzlage strukturiert eingeordnet werden. Auf dieser Grundlage lassen sich fundierte und praxisrelevante Schlussfolgerungen ableiten.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die einzelnen Schritte des methodischen Vorgehens detailliert dargestellt. Dies umfasst die Beschreibung der Literaturrecherche, der Ein- und Ausschlusskriterien im Sinne des PICO-Schemas, des Studiauswahlprozesses sowie der methodischen Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Studien (Siddaway et al., 2019).

Ein formales Studienprotokoll wurde nicht in einem Register (z. B. PROSPERO) hinterlegt, die Suchstrategie, Ein- und Ausschlusskriterien sowie der Screening Prozess wurden jedoch vor Beginn der Literaturrecherche definiert und im gesamten Reviewprozess konsequent umgesetzt, um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten und potenzielle Verzerrungen zu reduzieren (Page et al., 2021).

Aufgrund der methodischen Heterogenität der eingeschlossenen Studien hinsichtlich Interventionsgestaltung, Outcome-Parameter und Studiendesigns wurde auf die Durchführung einer quantitativen Metaanalyse verzichtet. Stattdessen erfolgte eine strukturierte, qualitative Synthese der Ergebnisse (Siddaway et al., 2019; Page et al., 2021).

3.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss des Timings sowie der Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit und auf regenerative Prozesse nach körperlicher Belastung bei ausdauertrainierten Erwachsenen systematisch zu untersuchen. Der Fokus der Arbeit liegt dabei ausschließlich auf ausdauerorientierten Belastungsformen (z. B. Laufen, Radfahren).

Die zentrale Forschungsfrage lautet:

Welchen Einfluss haben Timing (vor, während, nach der Belastung) und Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf objektive Leistungs- und Regenerationsparameter bei ausdauertrainierten Erwachsenen?

Zur weiteren Konkretisierung werden folgende Teilaspekte betrachtet:

- Inwiefern beeinflusst der Zeitpunkt der Kohlenhydratzufuhr (vor, während oder nach der Belastung) die sportliche Leistungsfähigkeit und die Regeneration?
- Unterscheiden sich unterschiedliche Kohlenhydratmengen hinsichtlich ihrer Effekte auf objektiv messbare Leistungs- und Regenerationsparameter?

Ziel ist es, die bestehende Evidenz systematisch zu analysieren und Unterschiede zwischen verschiedenen Zufuhrstrategien zu identifizieren, um daraus fundierte und praxisrelevante Schlussfolgerungen für die Sportwissenschaft und Trainingspraxis abzuleiten.

3.3 Ein- und Ausschlusskriterien

Die Ein- und Ausschlusskriterien wurden vor Beginn der Literaturrecherche festgelegt, um eine systematische und nachvollziehbare Studienauswahl sicherzustellen. Sie orientierten sich am PICO-Schema (Population, Intervention, Comparison, Outcome), wobei zusätzlich das Studiendesign als methodisches Kriterium berücksichtigt wurde.

Die vorliegende Arbeit fokussiert Studien mit gesunden, ausdauertrainierten Erwachsenen, in denen der Einfluss einer akuten Kohlenhydratzufuhr im direkten zeitlichen Zusammenhang mit einer ausdauerorientierten körperlichen Belastung untersucht wurde. Die Intervention umfasste ausschließlich isolierte Kohlenhydrate (ohne gleichzeitige Zufuhr relevanter Mengen anderer Makronährstoffe) oder Mischformen innerhalb von Kohlenhydraten, die vor, während oder nach der Belastung verabreicht wurden. Als Vergleichsbedingungen wurden unterschiedliche Zeitpunkte der Zufuhr, verschiedene Dosierungen sowie unterschiedliche Kohlenhydrattypen oder Placebo- bzw. Kontrollbedingungen berücksichtigt.

Als relevante Outcomes wurden ausschließlich objektiv messbare Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit und/oder der Regeneration einbezogen. Zudem wurden ausschließlich randomisierte kontrollierte Studien sowie Studien im Crossover-Design berücksichtigt. Studien mit kombinierter Makronährstoffzufuhr, mehrtägigen Ernährungsinterventionen oder ohne direkten Bezug zu Leistungs- oder Regenerationsparametern wurden ausgeschlossen.

Population (P)

Eingeschlossen wurden Studien mit gesunden, ausdauertrainierten Erwachsenen (≥ 18 Jahre) beider Geschlechter. Als ausdauertrainiert galten Personen, die in den jeweiligen Studien als trainiert, wettkampforientiert oder regelmäßig in ausdauerorientierten Sportarten aktiv waren.

Ausgeschlossen wurden Studien mit Kindern und Jugendlichen, klinischen Populationen, Personen mit diagnostizierten Erkrankungen oder akuten Verletzungen sowie Probandinnen und Probanden ohne regelmäßige sportliche Aktivität.

Intervention (I)

Eingeschlossen wurden experimentelle Studien mit einer akuten Kohlenhydratzufuhr im direkten zeitlichen Zusammenhang mit einer ausdauerorientierten körperlichen Belastung. Als relevante Zeitpunkte wurden Interventionen vor, während oder nach der Belastung berücksichtigt. Die Kohlenhydratzufuhr musste in isolierter Form erfolgen, wobei sowohl einzelne Kohlenhydratquellen (z. B. Glukose, Fruktose, Maltodextrin) als auch Mischformen innerhalb von Kohlenhydraten berücksichtigt wurden. Der Fokus lag auf ausdauerorientierten Belastungsformen, insbesondere auf Laufen und Radfahren.

Ausgeschlossen wurden: Kombinationen mit Protein und/oder Fett, bei denen der spezifische Effekt der Kohlenhydrate nicht eindeutig isolierbar ist, mehrtägige oder chronische Ernährungsinterventionen (z. B. Carbo-Loading) und Studien zur reinen Glykogenmanipulation ohne akute Kohlenhydratzufuhr. Studien mit reinem Krafttraining oder intermittierenden Mannschaftssportarten wurden ausgeschlossen.

Comparison (C)

Eingeschlossen wurden Studien mit geeigneten Vergleichsbedingungen, die unterschiedliche Zeitpunkte der Kohlenhydratzufuhr, unterschiedliche Dosierungen, verschiedene Kohlenhydrattypen oder eine Placebo- bzw. Kontrollbedingung gegenüberstellten.

Outcome (O)

Eingeschlossen wurden Studien, die objektiv messbare Parameter der sportlichen Leistungsfähigkeit (z. B. Time Trial, Zeit bis zur Erschöpfung, Leistungsoutput) und/oder der Regeneration (z. B. Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit, Glykogenresynthese) berichteten.

Ausgeschlossen wurden Studien, die ausschließlich molekulare oder biochemische Marker ohne direkten funktionellen Bezug zur tatsächlichen Leistungsfähigkeit oder zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit oder ausschließlich subjektive Skalen untersuchten.

Studiendesign

Eingeschlossen wurden ausschließlich randomisierte kontrollierte Studien (RCT) sowie Studien im Crossover-Design.

Ausgeschlossen wurden Beobachtungsstudien, Metaanalysen sowie nichtrandomisierte oder rein deskriptive Studiendesigns.

3.4 Literaturrecherche

Die systematische Literaturrecherche wurde am 14.01.2026 in den elektronischen Datenbanken PubMed und SPORTDiscus durchgeführt. Die Suchstrategie wurde vor Beginn der Literaturrecherche festgelegt und konsequent angewendet, um eine möglichst vollständige und reproduzierbare Identifikation relevanter Studien sicherzustellen. Die Auswahl dieser Datenbanken erfolgte aufgrund ihrer umfassenden

Abdeckung medizinischer, ernährungswissenschaftlicher und sportwissenschaftlicher Fachliteratur.

Die Suchstrategie orientierte sich an der zentralen Forschungsfrage sowie am PICOSchema. Zur Identifikation relevanter Studien wurden englischsprachige Suchbegriffe verwendet, die sich auf die Bereiche Kohlenhydratzufuhr, Timing, Dosierung, ausdauerorientierte Belastung, Leistungsparameter sowie Regeneration bezogen. Synonyme und thematisch verwandte Begriffe wurden mittels Boolean-Operatoren kombiniert. Synonyme innerhalb einer Kategorie wurden mit dem Operator „OR“ verknüpft, während unterschiedliche Themenbereiche mit „AND“ kombiniert wurden.

Die Recherche umfasste Publikationen im Zeitraum von 2000 bis 2025, um eine aktuelle und methodisch relevante Evidenzbasis sicherzustellen. Es wurden ausschließlich englischsprachige Studien an Menschen berücksichtigt. Die Beschränkung auf englischsprachige Publikationen kann zu einem Sprachbias führen, wodurch relevante Studien in anderen Sprachen potenziell nicht berücksichtigt wurden. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass relevante Studien durch die Auswahl der Datenbanken oder durch die verwendete Suchstrategie nicht identifiziert wurden (Publikationsbias).

Ein methodischer Filter hinsichtlich des Studiendesigns wurde in den Datenbanken bewusst nicht angewendet, um eine möglichst umfassende Identifikation potenziell relevanter Studien zu gewährleisten. Die Einschränkung auf randomisierte kontrollierte Studien sowie Studien im Crossover-Design erfolgte im anschließenden ScreeningProzess anhand der definierten Ein- und Ausschlusskriterien.

Die identifizierten Treffer wurden in das Literaturverwaltungsprogramm Zotero exportiert. Anschließend wurden Duplikate entfernt.

Die Suchbegriffe wurden in vier zentrale Kategorien unterteilt: (1) Ausdauerbelastung, (2) Kohlenhydratzufuhr, (3) Timing sowie (4) Leistungs- und Regenerationsparameter. Für jede dieser Kategorien wurden relevante Schlagwörter sowie Synonyme definiert und mithilfe von Boolean-Operatoren kombiniert. Synonyme innerhalb einer Kategorie wurden mit dem Operator „OR“ verknüpft, während unterschiedliche Kategorien mit „AND“ kombiniert wurden.

Die in PubMed verwendete Suchstrategie ist nachfolgend dargestellt:

("endurance exercise" OR "aerobic exercise" OR running OR cycling)

AND ("carbohydrate intake" OR carbohydrate OR "CHO intake")

AND (timing OR "pre-exercise" OR "during exercise" OR "post-exercise")

AND ("exercise performance" OR recovery OR "glycogen resynthesis" OR "muscle glycogen")

Die Suchstrategie wurde für die Datenbank SPORTDiscus entsprechend angepasst, um datenbankspezifische Suchsyntax und Indexierungen zu berücksichtigen.

3.5 Studienauswahl und Screening-Prozess

Die systematische Literaturrecherche ergab insgesamt 950 Treffer (PubMed: n = 640; SPORTDiscus: n = 310). Die identifizierten Publikationen wurden in das Literaturverwaltungsprogramm Zotero exportiert und auf Duplikate geprüft. Nach Entfernung der Duplikate verblieben 750 Studien für den weiteren Auswahlprozess.

Anschließend erfolgte ein strukturierter, zweistufiger Screening-Prozess auf Basis der definierten Ein- und Ausschlusskriterien. Das Screening wurde anhand der vorab festgelegten Kriterien einheitlich durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Titel und Abstract der identifizierten Studien anhand der definierten Ein- und Ausschlusskriterien überprüft. Dabei wurden 611 Studien ausgeschlossen, da sie die festgelegten Kriterien offensichtlich nicht erfüllten oder thematisch nicht den definierten Einschlusskriterien entsprachen.

Im zweiten Schritt wurden die verbleibenden 139 Studien im Volltext geprüft. Dabei wurde systematisch überprüft, ob die Studien hinsichtlich Population, Intervention, Vergleichsbedingungen, Outcomes und Studiendesign den zuvor definierten Kriterien entsprachen. Studien, die diese Anforderungen nicht erfüllten, wurden ausgeschlossen. Die jeweiligen Ausschlussgründe im Volltext-Screening wurden

dokumentiert, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Auswahlprozesses sicherzustellen.

Insgesamt wurden 12 Studien in die vorliegende Arbeit eingeschlossen.

Der gesamte Selektionsprozess orientierte sich an den PRISMA-2020-Leitlinien (Page et al., 2021) und ist in einem PRISMA-Flussdiagramm dargestellt (Abbildung 1). Dieses veranschaulicht die Anzahl der identifizierten Studien, der nach Duplikatentfernung verbleibenden Datensätze, der im Titel- und Abstract-Screening ausgeschlossenen Studien sowie der final eingeschlossenen Studien.

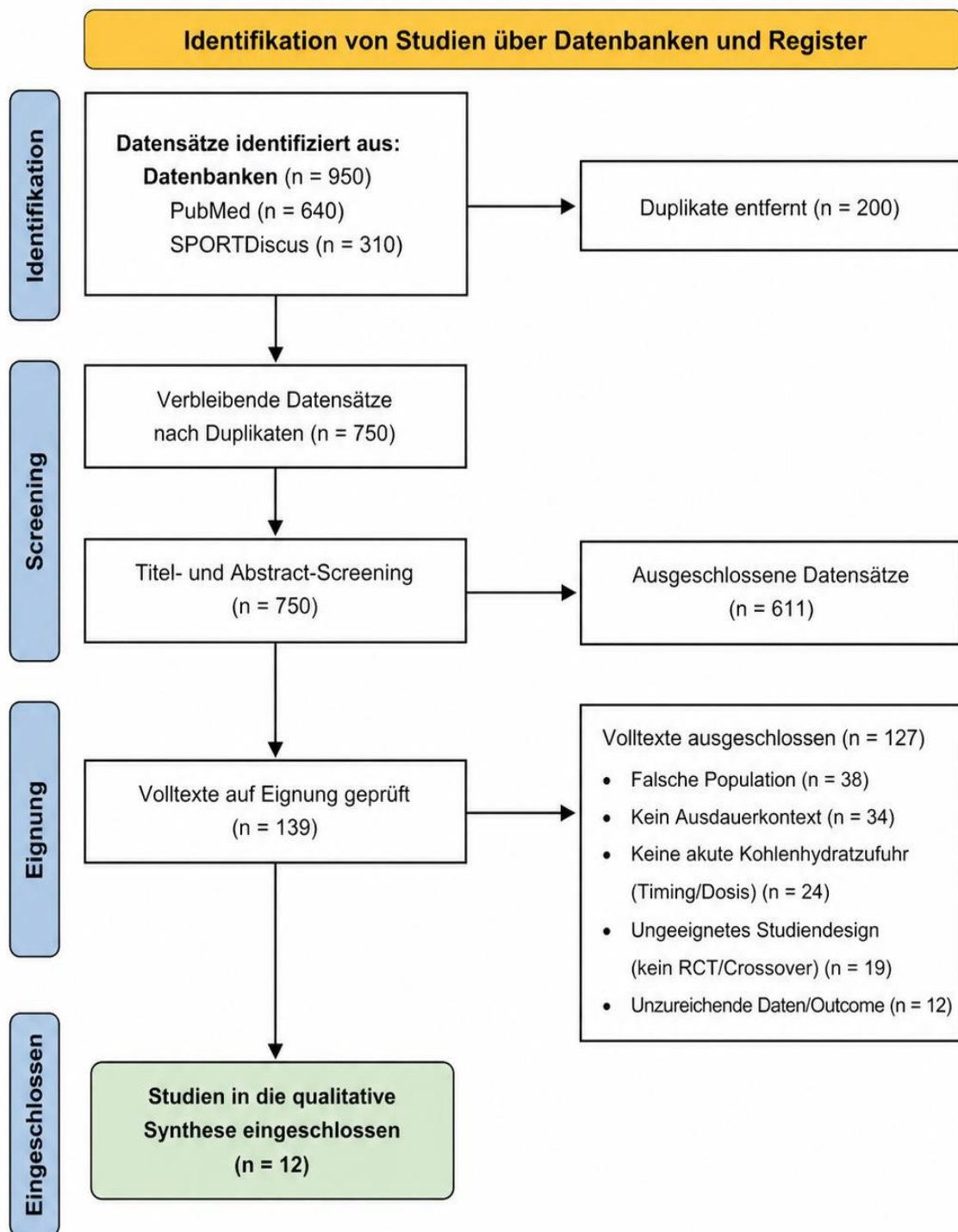


Abbildung 1. PRISMA 2020 Flow Diagramm des Studienauswahlprozesses.

PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses.

Abbildung 1: Prisma Flow

3.6 Datenextraktion und Datenaufbereitung

Die Datenextraktion der eingeschlossenen Studien erfolgte systematisch anhand vorab definierter Kriterien. Ziel war es, zentrale Informationen aus den Studien strukturiert zu erfassen und eine vergleichbare Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Für jede eingeschlossene Studie wurden relevante Merkmale erhoben, darunter Autorenschaft, Publikationsjahr, Stichprobengröße, Charakteristika der Teilnehmenden, Art der sportlichen Belastung, Details der Intervention (z. B. Kohlenhydratzufuhr hinsichtlich Menge, Timing und Form), Studiendesign sowie die untersuchten Outcome-Parameter im Bereich Leistungsfähigkeit und Regeneration. Ergänzend wurden Verträglichkeitsparameter wie gastrointestinale Beschwerden erfasst, sofern sie in den eingeschlossenen Studien berichtet wurden und zur Einordnung der Leistungs- oder Regenerationsergebnisse beitrugen.

Die extrahierten Daten wurden in tabellarischer Form zusammengefasst, um einen übersichtlichen Vergleich der Studien zu ermöglichen. Die tabellarische Darstellung dient als Grundlage für die anschließende qualitative Analyse und ermöglicht es, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Studien systematisch herauszuarbeiten.

Die Datenextraktion erfolgte auf Basis der publizierten Originalarbeiten. Aufgrund der Heterogenität der Studien wurde auf eine quantitative Zusammenführung der Daten verzichtet und stattdessen eine strukturierte, qualitative Auswertung durchgeführt.

3.7 Methodische Qualitätsbewertung mittels der PEDro-Skala

Zur Bewertung der methodischen Qualität der eingeschlossenen Studien wurde die PEDro-Skala (Physiotherapy Evidence Database Scale) verwendet. Die Wahl der PEDro-Skala erfolgte aufgrund ihrer etablierten Anwendung zur Bewertung randomisierter kontrollierter Studien sowie ihrer guten Praktikabilität im Kontext sportwissenschaftlicher Interventionsstudien. Dieses Instrument dient der Beurteilung der methodischen Qualität randomisierter kontrollierter Studien (de Morton, 2009).

Die PEDro-Skala umfasst zehn bewertete Kriterien, die zentrale Aspekte der Studienmethodik abbilden. Die einzelnen Kriterien werden jeweils mit „erfüllt“ oder „nicht erfüllt“ bewertet, wobei sich die Gesamtpunktzahl aus der Summe der erfüllten Kriterien ergibt und Werte zwischen 0 und 10 annehmen kann (de Morton, 2009).

Die Bewertung erfolgt anhand folgender Kriterien:

- zufällige Zuteilung der Teilnehmenden zu den Untersuchungsgruppen
- verdeckte Gruppenzuteilung
- Vergleichbarkeit der Gruppen zu Studienbeginn
- Verblindung der Teilnehmenden
- Verblindung der Therapeutinnen und Therapeuten
- Verblindung der Untersuchenden
- ausreichende Follow-up-Rate von mehr als 85 % für mindestens ein zentrales Outcome
- Anwendung einer Intention-to-Treat-Analyse
- Durchführung statistischer Vergleiche zwischen den Gruppen
- Angabe von Punkt- und Streuungsmaßen für mindestens ein zentrales Outcome

Die PEDro-Skala gilt als valides Instrument zur Beurteilung der methodischen Qualität klinischer Studien (de Morton, 2009).

Die Bewertung der eingeschlossenen Studien erfolgte auf Grundlage der publizierten Originalarbeiten. Die resultierenden PEDro-Punktwerte wurden dokumentiert und in tabellarischer Form dargestellt.

Die Qualitätsbewertung diente der Einordnung der methodischen Güte der Studien und führte nicht zum Ausschluss einzelner Arbeiten, sofern die definierten Ein- und Ausschlusskriterien erfüllt waren.

Studie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Punkte
1. Viribay et al., 2020	J	N	J	N	N	N	N	N	J	J	4
2. Stephens et al., 2008	J	N	J	N	N	N	J	N	J	J	5
3. Schweitzer et al., 2009	J	N	J	J	N	N	J	N	J	J	6
4. Ramonas et al., 2023	J	N	J	J	N	N	J	N	J	J	6
5. Podlogar et al., 2026	J	N	J	J	N	J	J	N	J	J	7
6. Oosthuyse et al., 2015	J	N	J	J	J	J	J	N	J	J	8
7. Newell et al., 2018	J	N	J	J	J	J	J	N	J	J	8
8. Maunder et al., 2018	J	N	J	J	N	N	J	N	J	J	6
9. Learsy et al., 2019	J	N	J	J	J	J	J	N	J	J	8
10. King et al., 2018	J	N	J	J	J	J	J	N	J	J	8
11. King et al., 2019	J	N	J	J	J	J	J	N	J	J	8
12. Campbell et al., 2008	J	N	J	N	N	N	J	N	J	J	5

Tabelle 1: Beurteilung PEDro-Skala

Die methodische Qualität der eingeschlossenen Studien wurde mithilfe der PEDro-Skala beurteilt. Zur besseren Übersicht erfolgte eine fortlaufende Nummerierung der Studien (Studie 1–12).

Insgesamt weisen die analysierten Studien eine moderate bis gute methodische Qualität auf. Die erreichten PEDro-Scores lagen zwischen 4 und 8 Punkten. Der Großteil der Studien erfüllte die Kriterien der randomisierten Zuteilung, der Vergleichbarkeit der Gruppen zu Studienbeginn sowie der Durchführung statistischer Gruppenvergleiche und der Angabe von Punkt- und Streuungsmaßen. Darüber hinaus trug die konsequente Anwendung von Crossover-Designs in 11 der 12 Studien wesentlich zur methodischen Qualität bei, da interindividuelle Unterschiede auf diese Weise reduziert werden konnten, wenngleich potenzielle Carryover-Effekte berücksichtigt werden müssen.

Eine besonders hohe methodische Qualität mit jeweils 8 Punkten wurde in den Studien 6, 7, 9, 10 und 11 (Oosthuyse et al., 2015; Newell et al., 2018; Learsy et al., 2019; King et al., 2018; King et al., 2019) erreicht. Diese Studien zeichneten sich durch eine umfangreiche Verblindung der Teilnehmenden sowie teilweise des Studienpersonals aus, wobei häufig angegeben wurde, dass die Supplementlösungen durch unabhängiges Laborpersonal vorbereitet wurden, um eine Verblindung der Versuchsleiter und der Untersuchenden zu gewährleisten.

Methodische Einschränkungen zeigten sich insbesondere in Bezug auf die verdeckte Gruppenzuteilung (Allocation Concealment) sowie die Durchführung einer Intention-to-Treat-Analyse, für die in den meisten Studien keine ausreichenden Informationen vorlagen. Infolgedessen wurden ausschließlich vollständige Datensätze berücksichtigt (Per-Protocol-Analyse). Die Studie 1 (Viribay et al., 2020) erzielte mit 4 Punkten die niedrigste Bewertung, was vor allem auf die fehlende Verblindung sowie eine Followup-Rate von unter 85 % zurückzuführen ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die eingeschlossenen Studien trotz der genannten methodischen Einschränkungen eine solide Grundlage darstellen. Die identifizierten Limitationen sind überwiegend durch die spezifischen Anforderungen sportwissenschaftlicher Feld- und Laborinterventionen bedingt und können die Aussagekraft der Ergebnisse potenziell einschränken.

Das vorliegende Kapitel beschreibt das methodische Vorgehen, mit dem die relevante Evidenz zur Beantwortung der Forschungsfrage systematisch identifiziert, ausgewählt und hinsichtlich ihrer methodischen Qualität bewertet wurde. Durch die Anwendung eines systematischen Reviews, klar definierter Ein- und Ausschlusskriterien, eines strukturierten Screening-Prozesses sowie der Qualitätsbewertung mittels PEDroSkala wurde eine nachvollziehbare Grundlage für die Auswertung der eingeschlossenen Studien geschaffen.

Auf dieser methodischen Basis werden im folgenden Kapitel die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien systematisch dargestellt und im Hinblick auf den Einfluss von Timing und Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration analysiert.

4. Ergebnisse

Aufbauend auf dem in Kapitel 3 dargestellten methodischen Vorgehen werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der 12 eingeschlossenen Studien systematisch und deskriptiv dargestellt sowie vergleichend analysiert. Ziel ist es, konsistente Muster und Unterschiede hinsichtlich der Effekte der Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit und die Regeneration herauszuarbeiten.

Die Struktur des Kapitels orientiert sich zunächst an den Studien- und Interventionscharakteristika, bevor die Effekte auf Leistungsfähigkeit und Regeneration differenziert dargestellt werden. Auf diese Weise wird eine systematische Grundlage für die anschließende Diskussion der Ergebnisse geschaffen.

Die Tabelle verdeutlicht die methodische Vielfalt der Studien hinsichtlich Belastungsprotokollen, Interventionsstrategien und Outcome-Parameter.

Autor (Jahr)	Stichprobe	Sportart / Belastung	Studiendesign	Dauer
Viribay et al. (2020)	20 Eliteathleten	Bergmarathon (~42 km)	Randomisiert (Parallel)	~4,5 h
Stephens et al. (2008)	8 Männer	Radfahren bis Erschöpfung	Randomisiert (Crossover)	~90 min
Schweitzer et al. (2009)	10 Radfahrer	2 h + TT	Randomisiert (Crossover)	~120 min
Ramonas et al. (2023)	8 Männer	Depletion + HIIT + TTE	Randomisiert (Crossover)	~100 min
Podlogar et al. (2026)	12 Männer	3 h + TT	Randomisiert (Crossover)	~180 min
Oosthuyse et al. (2015)	9 Männer	2 h + TT	Doppelblind (Crossover)	~120 min
Newell et al. (2018)	20 Männer	2 h + TT	Doppelblind (Crossover)	~120 min

Maunder et al. (2018)	8 Athleten	2x Lauf + Pause	Crossover	variabel
Learsie et al. (2019)	9 Männer	105 min + TT	Doppelblind	~105 min
King et al. (2018)	10 Männer	2 h + TT	Crossover	~120 min
King et al. (2019)	11 Männer	3 h + TT	Crossover	~180 min
Campbell et al. (2008)	16 Athleten	80 min + TT	Crossover	~80 min
Autor (Jahr)	Intervention (CHO)	Timing	Outcome	Hauptergebnis
Viribay et al. (2020)	60–120 g/h (Mal:Fruk)	während	Muskelschäden	120 g/h am besten
Stephens et al. (2008)	100 g (HMW vs. LMW)	nach	Glykogen, Leistung	HMW überlegen
Schweitzer et al. (2009)	75 g (versch. Muster)	während	TT-Leistung	kein Effekt
Ramonas et al. (2023)	60 g/h vs. Placebo	vor + während	TTE	CHO ↑ Leistung
Podlogar et al. (2026)	90 g/h	während	Leistung, GI	kein Effekt, GI besser
Oosthuysen et al. (2015)	63 g/h	vor + während	TT	Isomaltulose schlechter
Newell et al. (2018)	0–64 g/h	vor + während	Leistung	≥39 g/h notwendig
Maunder et al. (2018)	90 g/h (Fru+Mal)	Regeneration	TTE	+32% Leistung
Learsie et al. (2019)	8% CHO	vor + während	TT	Leistung verbessert
King et al. (2018)	60–112 g/h	während	Leistung	90 g/h optimal

King et al. (2019)	80–100 g/h	während	Leistung	90 g/h optimal
Campbell et al. (2008)	0,6 g/kg/h	vor + während	TT	alle Formen gleich

Tabelle 2: Ergebnisse

4.1 Studiencharakteristika

Die Evidenzbasis dieser Arbeit umfasst 12 randomisierte kontrollierte Studien mit insgesamt 141 ausdauertrainierten Erwachsenen. Die Stichproben bestanden überwiegend aus ausdauertrainierten Männern ($n = 129$), wobei in drei Untersuchungen auch Frauen ($n = 12$) einbezogen wurden (Campbell et al., 2008; Maunder et al., 2018; Schweitzer et al., 2009). Die Population setzt sich primär aus Radfahrern, Läufern und Triathleten zusammen, die mit einer Trainingserfahrung von meist über zwei bis drei Jahren sowie $VO_2\text{max}$ -Werten zwischen 41 und 62 ml/kg/min ein vergleichsweise homogenes Leistungsniveau aufwiesen. Eine Ausnahme bildet die Studie von Viribay et al. (2020), die explizit Elite-Athleten untersuchte.

Ein zentrales gemeinsames Merkmal der eingeschlossenen Studien ist die Wahl des Studiendesigns. Elf der zwölf Untersuchungen verwendeten ein Crossover-Design, wodurch interindividuelle Unterschiede minimiert wurden (Maunder et al., 2018; Podlogar et al., 2026; Stephens et al., 2008). Zur Sicherung der Ergebnisqualität wurden die Interventionen überwiegend doppelblind und placebokontrolliert durchgeführt (King et al., 2019; Newell et al., 2018). Lediglich die Untersuchung von Viribay et al. (2020) wurde als paralleles Gruppensdesign realisiert.

Hinsichtlich der Untersuchungsbedingungen zeigen sich Unterschiede zwischen Labor- und Feldstudien. Elf Studien fanden unter kontrollierten Laborbedingungen auf Fahrradergometern oder Laufbändern statt, was eine präzise Kontrolle von Belastungsintensität und Umweltfaktoren ermöglichte (King et al., 2019; Schweitzer et al., 2009). Im Gegensatz dazu untersuchten Viribay et al. (2020) die Kohlenhydratzufuhr im Rahmen eines realen Bergmarathons, was die ökologische Validität erhöht, jedoch die Kontrolle externer Faktoren einschränkt (Viribay et al., 2020).

Die Belastungsprotokolle umfassten standardisierte Ausdauerbelastungen mit anschließenden Leistungsdiagnostiken in Form von Time-Trials (Campbell et al., 2008; King et al., 2018) oder Tests bis zur Erschöpfung (TTE) (Maunder et al., 2018; Ramonas et al., 2023). Unterschiede bestehen vor allem in der Belastungsdauer sowie im Glykogenstatus der Probanden vor Testbeginn (Ramonas et al., 2023; Podlogar et al., 2026).

Insgesamt weisen die Studien eine hohe strukturelle Vergleichbarkeit auf, unterscheiden sich jedoch in methodischen Aspekten, wie dem Leistungsstatus und der Untersuchungsumgebung, was für die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Bedeutung ist (Viribay et al., 2020; Podlogar et al., 2026).

4.2 Charakteristika der Interventionen

Die zeitliche Gestaltung der Kohlenhydratzufuhr wurde in den eingeschlossenen Studien differenziert für die Phase vor, während und nach der Belastung untersucht. Vor der Belastung analysierten mehrere Studien die Effekte einer akuten Kohlenhydratzufuhr in Form von Mahlzeiten oder Getränken. Dabei wurden sowohl kohlenhydratreiche Mahlzeiten in unterschiedlichen zeitlichen Abständen vor der Belastung als auch die kurzfristige Aufnahme flüssiger Kohlenhydrate unmittelbar vor dem Start berücksichtigt. Ziel dieser Strategien war es, die Verfügbarkeit exogener Kohlenhydrate bereits zu Beginn der Belastung zu erhöhen (Campbell et al., 2008; Learsi et al., 2019; Oosthuyse et al., 2015; Newell et al., 2018; Ramonas et al., 2023). Im Gegensatz dazu verzichteten einige Studien bewusst auf eine Kohlenhydratzufuhr vor der Belastung und ließen die Probanden nach einer nächtlichen Fastenphase antreten, um die Effekte der Kohlenhydratzufuhr während oder nach der Belastung isoliert untersuchen zu können (King et al., 2018, 2019; Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008). Während der Belastung stand in den meisten Studien die kontinuierliche oder variierende Zufuhr von Kohlenhydraten im Fokus. Die in den Studien untersuchten Kohlenhydratmengen (CHO) decken ein breites Spektrum von 20 g/h bis 120 g/h ab und repräsentieren damit unterschiedliche praxisrelevante Zufuhrstrategien. Hinsichtlich der Kohlenhydratquellen zeigt sich eine Übereinstimmung in der Verwendung von Mehrfach-Transport-Mischungen, bestehend aus Glukose bzw. Maltodextrin und Fruktose, die in mehreren Studien

verwendet wurden (King et al., 2018; Podlogar et al., 2026). Diese Mischungen wurden in spezifischen Verhältnissen eingesetzt. Ein Verhältnis von 2:1 fand in mehreren Untersuchungen Anwendung (King et al., 2018; King et al., 2019; Viribay et al., 2020). Andere Studien nutzten Verhältnisse von 1,5:1 (Maunder et al., 2018) oder 0,8:1 (Oosthuyse et al., 2015; Podlogar et al., 2026), um die intestinale Aufnahme über Transporter SGLT1 und GLUT5 zu optimieren. Ergänzend wurden alternative Formen wie Isomaltulose (Oosthuyse et al., 2015) oder hochmolekulare Glukosepolymere (Stephens et al., 2008) analysiert.

Die Darreichungsform der Kohlenhydrate variierte zwischen flüssigen Sportgetränken, Gels (Viribay et al., 2020) und festen Formen wie Jelly Beans (Campbell et al., 2008). Dabei wurden die Lösungen meist in Konzentrationen zwischen 6 % und 8 % verabreicht (Campbell et al., 2008; Ramonas et al., 2023).

Bezüglich der zeitlichen Verteilung der Kohlenhydratzufuhr während der Belastung (intra-exercise) lag der Fokus auf unterschiedlichen Zufuhrschemata. Hierbei wurden konstante Raten oder variable Schemata (z. B. zunehmende, abnehmende oder Frontloading-Muster) verglichen (Podlogar et al., 2026; Schweitzer et al., 2009). Einzelne Studien betrachteten zudem den Einfluss des Ernährungsstatus vor Belastung (nüchtern vs. gesättigt) (Learsi et al., 2019).

Ein wesentliches Merkmal der Hochdosis-Intervention (120 g/h) war die Berücksichtigung eines vorherigen Darm-Trainings. Hierbei absolvierten die Probanden über mehrere Wochen ein spezifisches Protokoll zur Steigerung der gastrointestinalen Toleranz und Absorptionskapazität, um die hohen Ingestionsraten während der Belastung ohne Beschwerden bewältigen zu können (Viribay et al., 2020).

Neben der Zufuhr während der Belastung wurde auch der Zeitpunkt der Kohlenhydrataufnahme in der Regenerationsphase untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt war das Timing nach der Belastung (post-exercise), bei dem die Wirkung einer CHO-Zufuhr in der frühen Regenerationsphase (2 bis 4 Stunden) auf eine anschließende Leistungsprüfung untersucht wurde (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008).

Insgesamt zeigt sich eine hohe Variabilität der Interventionsansätze, wodurch die Faktoren Dosierung und Timing differenziert betrachtet werden können, wenngleich die direkte Vergleichbarkeit zwischen den Studien teilweise eingeschränkt ist.

4.3 Einfluss der Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit

4.3.1 Einfluss der Dosierung

Die analysierten Studien zeigen ein differenziertes Bild hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen der Kohlenhydratmenge (CHO) und der Leistungsfähigkeit. Newell et al. (2018) dokumentieren, dass eine Zufuhr von 20 g/h im Vergleich zu Wasser keine signifikante Veränderung der Time-Trial-Leistung bewirkte. Erst ab einer Ingestionsrate von 39 g/h wurden signifikante Leistungsverbesserungen festgestellt, während höhere Dosierungen (64 g/h) keinen zusätzlichen signifikanten Leistungszuwachs zeigten (Newell et al., 2018). Dieser Schwellenwert von 39 g/h war mit einer 61%igen Unterdrückung der hepatischen Glukoseproduktion assoziiert (Newell et al., 2018).

Hinsichtlich höherer Dosierungen identifizierten King et al. (2018, 2019) eine Zufuhr von 90 g/h (Glukose-Fruktose) als die Bedingung mit den höchsten mittleren Leistungswerten im Vergleich zu 60-80 g/h sowie 100-112,5 g/h. In der Untersuchung von 2019 war der Power-Output bei 90 g/h um 6,8 % höher als bei einer Zufuhr von 100 g/h (King et al., 2019). King et al. (2018, 2019) berichteten bei höheren Zufuhrmengen über keinen zusätzlichen leistungssteigernden Effekt beziehungsweise über ungünstigere Werte im Vergleich zu 90 g/h, was von den Autoren mit Limitierungen der intestinalen Transportkapazität und einer erhöhten relativen Muskelglykogenutzung in Verbindung gebracht wurde.

Ein modifizierender Faktor der Dosierungen ist die verwendete Kohlenhydratquelle. Oosthuyse et al. (2015) zeigten, dass eine Zufuhr von 63 g/h bei Verwendung von Isomaltulose zu einer signifikant langsameren Time-Trial-Zeit (+1,5 min) im Vergleich zu einer Fruktose-Maltodextrin-Mischung führte.

Unter Feldbedingungen zeigte die Studie von Viribay et al. (2020), dass eine höhere Kohlenhydratzufuhr (120 g/h) mit geringeren Muskelschädigungsmarkern im Vergleich zu 60 bzw. 90 g/h verbunden war. Ergänzend dazu zeigten Ramonas et al. (2023), dass bei reduzierten Glykogenspeichern eine Dosis von 60 g/h die Zeit bis zur Erschöpfung von 2,5 min (Placebo) auf 7,1 min steigerte.

Insgesamt variierten die Effekte der Dosierung zwischen den Studien, wobei 90 g/h in mehreren Laborstudien mit günstigen Leistungswerten assoziiert waren, während unter Feldbedingungen und bei Glykogenmangel auch höhere oder moderate Dosen spezifische metabolische oder belastungsrelevante Vorteile zeigten.

4.3.2 Einfluss des Timings

Die zeitliche Verteilung der Kohlenhydratzufuhr (CHO) während der Belastung wurde in mehreren Studien systematisch untersucht, wobei konstante Zufuhrmuster mit variierenden Strategien wie Front-loading, End-loading oder progressiven Schemata verglichen wurden (Schweitzer et al., 2009; Podlogar et al., 2026).

Die Ergebnisse zeigen eine weitgehende Übereinstimmung dahingehend, dass sich zwischen diesen Mustern keine signifikanten Unterschiede in der Leistung ergeben. Sowohl Schweitzer et al. (2009) als auch Podlogar et al. (2026) berichteten, dass unabhängig von der Verteilungsstrategie keine signifikanten Unterschiede in der Time-Trial-Leistung bei Belastungsdauern zwischen zwei und drei Stunden auftraten.

Trotz der fehlenden Unterschiede zeigten sich Differenzen auf metabolischer Ebene. Podlogar et al. (2026) dokumentierten, dass ein abnehmendes Schema (DEC) im Vergleich zu einer konstanten Zufuhr mit einer um 7,1 % höheren exogenen Kohlenhydratoxidationsrate verbunden war, während ein zunehmendes Schema (INC) eine geringere Oxidationsrate aufwies. Darüber hinaus berichteten die Autoren, dass insbesondere das abnehmende Zufuhrschema (DEC) mit einem verbesserten gastrointestinalen Komfort verbunden war. Zudem berichteten Schweitzer et al. (2009) Unterschiede in der Glukosekinetik zwischen den Zufuhrstrategien.

Learsi et al. (2019) zeigten, dass die Kohlenhydratzufuhr während der Belastung die Time-Trial-Leistung sowohl im nüchternen als auch im gesättigten Zustand im Vergleich zu Placebo verbesserte, wobei der Effekt in beiden Zuständen vergleichbar war.

Bezüglich des Timings nach der Belastung (Regeneration) dokumentieren zwei Studien signifikante Vorteile für die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit, wobei diese Effekte in Abhängigkeit vom verwendeten Kohlenhydrattyp beobachtet wurden (Stephens et al., 2008; Maunder et al., 2018).

Zusammenfassend zeigten die Studien, dass die zeitliche Verteilung der Kohlenhydratzufuhr während der Belastung bei moderaten Belastungsdauern kaum Einfluss auf die Leistung hatte, jedoch Unterschiede auf metabolischer Ebene beobachtet wurden. Für die Phase unmittelbar nach der Belastung zeigten sich hingegen Unterschiede in der kurzfristigen Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit.

4.3.3 Einfluss von Kohlenhydrattyp und Darreichungsform

Neben der Dosierung und dem Timing wurde in mehreren Studien der Einfluss des Kohlenhydrattyps sowie der Darreichungsform auf die sportliche Leistungsfähigkeit untersucht. Hinsichtlich des Kohlenhydrattyps belegen die Studien Unterschiede zwischen verschiedenen Substraten. Oosthuyse et al. (2015) berichteten, dass die Verwendung von Isomaltulose im Vergleich zu einer Fruktose-Maltodextrin-Mischung (F:M) mit signifikant langsameren Time-Trial-Zeiten (+1,5 min) verbunden war. Während die F:M-Bedingung die Kohlenhydratoxidation stabilisierte, führte Isomaltulose zu einer signifikant geringeren Kohlenhydratoxidation (Oosthuyse et al., 2015).

Ergänzend dazu untersuchten King et al. (2018) die Substratzusammensetzungen und zeigten, dass Mischungen aus Glukose und Fruktose (LGF) im Vergleich zu Einzelkohlenhydraten (reine Glukose) mit signifikant höheren maximalen Oxidationsraten (1,33 g/min vs. 0,88 g/min) verbunden waren (King et al., 2018). Diese erhöhte Effizienz resultierte in einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für eine verbesserte Time-Trial-Leistung gegenüber Einzelkohlenhydraten (King et al., 2018). Ein weiterer relevanter Aspekt des Typs ist das molekulare Gewicht der Kohlenhydrate. Stephens et al. (2008) zeigten, dass die Zufuhr eines hochmolekularen Glukosepolymers unmittelbar nach einer Belastung zu einer um 10 % höheren Arbeitsleistung in einem anschließenden Test führte als ein herkömmliches niedermolekulares Polymer (Stephens et al., 2008). Zudem dokumentierten Maund et al. (2018), dass eine Fruktose-Maltodextrin-Mischung die anschließende Ausdauerkapazität um 32,4 % stärker verbesserte als eine reine Glukose-Maltodextrin-Lösung.

Im Gegensatz dazu ergaben sich hinsichtlich der physischen Darreichungsform keine signifikanten Unterschiede in der Leistungsfähigkeit. Campbell et al. (2008) verglichen die Aufnahme von Kohlenhydraten in Form von Getränken, Gels und Jelly Beans.

Zwischen den Darreichungsformen bestanden keine signifikanten Unterschiede in der Time-Trial-Leistung (Campbell et al., 2008).

Insgesamt deuten die eingeschlossenen Studien darauf hin, dass der Kohlenhydrattyp, insbesondere Mischungsverhältnis und molekulare Struktur, die sportliche Leistungsfähigkeit beeinflussen kann (King et al., 2018), während für die Darreichungsform keine Unterschiede beobachtet wurden (Campbell et al., 2008).

4.4 Einfluss der Kohlenhydratzufuhr auf die Regeneration

Neben den leistungsbezogenen Effekten wurden in den eingeschlossenen Studien auch verschiedene Aspekte der Regeneration untersucht. Dabei lassen sich sowohl konsistente Muster als auch Unterschiede zwischen den Studien hinsichtlich funktioneller und biochemischer Parameter identifizieren.

4.4.1 Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit

Die Studien zeigen übereinstimmend, dass die Kohlenhydratzufuhr (CHO) während oder nach einer Belastung einen positiven Einfluss auf die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit in nachfolgenden Belastungen hatte (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008; Ramonas et al., 2023).

Maunder et al. (2018) wiesen nach, dass die Zufuhr eines Fruktose-Maltodextrin-Gemischs (90 g/h) während einer vierstündigen Erholungsphase im Vergleich zu einer Glukose-Maltodextrin-Lösung zu einer signifikanten Steigerung der Ausdauerkapazität führte. Die zweite Belastungseinheit zeigte unter der Fruktose-Maltodextrin-Bedingung eine signifikant höhere Ausdauerkapazität (Maunder et al., 2018).

Ergänzend dazu berichteten Stephens et al. (2008), dass die Aufnahme hochmolekularer Glukosepolymere unmittelbar nach einer Belastung im Vergleich zu niedermolekularen Lösungen mit einem um 10 % signifikant höheren Work Output in einem Folgetest nach einer zweistündigen Pause verbunden war (Stephens et al., 2008). Auf physiologischer Ebene führte die Zufuhr der hochmolekularen Polymere zu einem schnelleren und höheren Anstieg der Blutglukose- und Insulinwerte während der

ersten 30 bis 40 Minuten der Erholungsphase sowie zu einer beschleunigten Glykogenresynthese (Stephens et al., 2008).

Einen weiteren Beleg für die Wiederherstellung der Kapazität liefern Ramonas et al. (2023). Nach einem Glykogen-Depletionsprotokoll und einer zweistündigen Pause führte eine CHO-Zufuhr (60 g/h) im Vergleich zu einem Placebo zu einer signifikanten Verlängerung der Zeit bis zur Erschöpfung (TTE) (Ramonas et al., 2023). Die Probanden erreichten unter Kohlenhydratzufuhr eine Zeit von 7,1 min, während sie unter Placebo-Bedingungen nach 2,5 min erschöpft waren (Ramonas et al., 2023).

Zusammenfassend deuten diese Untersuchungen darauf hin, dass sowohl die Menge als auch der Kohlenhydrattyp die funktionelle Regeneration innerhalb kurzer Zeitfenster von zwei bis vier Stunden beeinflussen können (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008; Ramonas et al., 2023).

4.4.2 Weitere regenerative Prozesse

Neben der funktionellen Wiederherstellung wurden in den eingeschlossenen Studien biochemische und hormonelle Parameter der Regeneration untersucht, die den Zustand der Erholung nach der Belastung beschreiben.

Ein deutliches Muster zeigt sich in Bezug auf die Dosierung der Kohlenhydratzufuhr (CHO) und Marker der Muskelschädigung. Viribay et al. (2020) wiesen nach, dass eine Zufuhr von 120 g/h (EXP) im Vergleich zu 90 g/h (CON) oder 60 g/h (LOW) mit signifikant niedrigeren Konzentrationen von Markern für Muskelschädigung 24 Stunden nach einem Bergmarathon assoziiert war. Der Anstieg der Kreatinkinase war in der Gruppe mit hoher Kohlenhydratzufuhr deutlich geringer als in den Vergleichsgruppen. Ähnliche Unterschiede zeigten sich auch für weitere Marker der Muskelschädigung.

Hinsichtlich der hormonellen Stressreaktion dokumentierten Ramonas et al. (2023), dass die Kohlenhydratzufuhr den Anstieg der Cortisolspiegel dämpfte, wobei die Werte in einer Placebo-Bedingung ab Minute 15 der Belastung bis zur Erschöpfung signifikant höher anstiegen. Newell et al. (2018) ergänzten, dass die AdrenalinKonzentration bei einer Zufuhr von 39 g/h oder 64 g/h mit 0,78 ng/mL signifikant niedriger war als unter einer Wasser-Bedingung (0,99 ng/mL).

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Kohlenhydratzufuhr auch für regenerative Prozesse relevant ist. Dabei zeigten sich insbesondere Vorteile einer frühen post-exercise-Zufuhr sowie Unterschiede in Abhängigkeit von Dosis und Kohlenhydrattyp.

Das vorliegende Kapitel zeigt, dass die eingeschlossenen Studien trotz methodischer Unterschiede konsistente Muster hinsichtlich des Einflusses von Timing, Dosierung und Kohlenhydrattyp auf die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration erkennen lassen. Gleichzeitig wurden Unterschiede zwischen einzelnen Interventionsstrategien und Belastungskontexten deutlich, die einer weiterführenden Einordnung bedürfen.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden im folgenden Kapitel die Befunde im Kontext der Forschungsfrage, bestehender Literatur sowie möglicher physiologischer Erklärungsansätze diskutiert.

5. Diskussion

Dieses Kapitel dient der Einordnung und Interpretation der im Ergebnisteil dargestellten Befunde im Hinblick auf die Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit. Auf Grundlage der identifizierten Zusammenhänge zwischen Timing, Dosierung und Art der Kohlenhydratzufuhr werden die Ergebnisse im Kontext bestehender Literatur sowie zugrunde liegender physiologischer Mechanismen diskutiert.

Zunächst erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse im Hinblick auf die Forschungsfrage. Anschließend werden zentrale Einflussfaktoren der Kohlenhydratzufuhr differenziert diskutiert, um die Befunde kritisch zu bewerten und ihre Bedeutung für die sportwissenschaftliche Forschung und Trainingspraxis herauszuarbeiten.

5.1 Einordnung der Ergebnisse im Kontext der Forschungsfrage

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, den Einfluss des Timings und der Dosierung der Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit sowie auf regenerative Prozesse bei ausdauertrainierten Erwachsenen systematisch zu untersuchen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sprechen insgesamt dafür, dass die Kohlenhydratzufuhr einen relevanten Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit sowie auf die Regeneration hat, wobei insbesondere die Dosierung als zentraler Einflussfaktor identifiziert werden kann. In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass moderate bis hohe Zufuhrmengen mit verbesserten Leistungsparametern einhergehen, sowohl in Time-Trial- als auch in Time-to-Exhaustion-Protokollen, während sehr niedrige Mengen keine signifikanten Effekte im Vergleich zu Placebo aufweisen (Newell et al., 2018; King et al., 2018; Ramonas et al., 2023). Gleichzeitig deuten die Ergebnisse darauf hin, dass unter kontrollierten Laborbedingungen Zufuhrmengen um 90 g/h häufig mit günstigen Leistungswerten assoziiert sind, während unter praxisnahen Bedingungen auch sehr hohe Zufuhrmengen bei entsprechender gastrointestinaler Anpassung mit geringeren Muskelschädigungsmarkern verbunden sein können (Viribay et al., 2020).

Hinsichtlich des Timings ergibt sich ein differenziertes Bild. Die zeitliche Verteilung der Kohlenhydratzufuhr während der Belastung scheint unter moderaten

Belastungsdauern keinen entscheidenden Einfluss auf die unmittelbare Leistungsfähigkeit zu haben (Schweitzer et al., 2009; Podlogar et al., 2026). Demgegenüber zeigt sich, dass die Zufuhr von Kohlenhydraten in der frühen Regenerationsphase nach der Belastung eine zentrale Rolle für die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit spielt (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008). Dies deutet darauf hin, dass der Zeitpunkt der Zufuhr insbesondere im Hinblick auf regenerative Prozesse von Bedeutung ist, während er für die akute Leistungsfähigkeit während der Belastung eine untergeordnete Rolle einnimmt (Schweitzer et al., 2009; Maunder et al., 2018).

Darüber hinaus wird deutlich, dass auch qualitative Aspekte der Kohlenhydratzufuhr eine Rolle spielen. Insbesondere Mehrfach-Transport-Mischungen zeigen im Vergleich zu Einzelkohlenhydraten Vorteile hinsichtlich der Kohlenhydratoxidation und der Leistungsfähigkeit (King et al., 2018; Podlogar & Wallis, 2022; Maunder et al., 2018). Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass hohe Zufuhrmengen mit potenziellen Einschränkungen in der gastrointestinalen Verträglichkeit verbunden sein können, wodurch individuelle Unterschiede in der Umsetzung berücksichtigt werden müssen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sowohl die Dosierung als auch das Timing und die Zusammensetzung der Kohlenhydratzufuhr die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration beeinflussen, wobei die Bedeutung dieser Faktoren in Abhängigkeit vom Belastungskontext und individuellen Voraussetzungen variiert. Die Ergebnisse liefern damit eine differenzierte Beantwortung der Forschungsfrage und bilden die Grundlage für eine weiterführende Einordnung im Kontext bestehender Literatur.

5.2 Diskussion der zentralen Einflussfaktoren

Im folgenden Abschnitt werden die zentralen Einflussfaktoren der Kohlenhydratzufuhr differenziert diskutiert. Dabei werden insbesondere die Dosierung, das Timing sowie der Kohlenhydrattyp und die Darreichungsform im Hinblick auf ihre Bedeutung für die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration eingeordnet. Ziel ist es, die im Ergebnisteil identifizierten Zusammenhänge im Kontext physiologischer Mechanismen und bestehender Literatur zu interpretieren.

5.2.1 Dosierung der Kohlenhydratzufuhr

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die Dosierung der Kohlenhydratzufuhr (CHO) einen zentralen Einfluss auf die sportliche Leistungsfähigkeit sowie auf regenerative Prozesse ausübt. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der bestehenden Literatur, die eine dosisabhängige Beziehung zwischen exogener Kohlenhydratzufuhr und Leistungsfähigkeit beschreibt. Ein wesentlicher Befund der analysierten Studien ist das Auftreten eines metabolischen Schwellenwerts, ab dem Kohlenhydratzufuhr leistungsrelevant wird. Zufuhrmengen unterhalb dieses Schwellenwerts, wie etwa 20 g/h, scheinen keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit zu haben, während Mengen ab ca. 39 g/h mit deutlichen Leistungsverbesserungen assoziiert sind (Newell et al., 2018). Dieser Zusammenhang lässt sich physiologisch durch die zunehmende Verfügbarkeit exogener Kohlenhydrate erklären, die zu einer Entlastung der endogenen Glykogenspeicher, insbesondere der Leber führt und somit die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit während längerer Belastungen unterstützt (King et al., 2018; King et al., 2019). Interessanterweise zeigen die Daten von Newell et al. (2018), dass über diesen Schwellenwert von ca. 40 g/h hinaus bei moderaten Belastungsdauern (< 3 h) und der Verwendung von Einzelkohlenhydraten (Glukose) oft kein linearer Mehrwert mehr erzielt wird.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass sich unter Laborbedingungen ein Bereich um 90 g/h mit besonders günstigen Leistungswerten abzeichnet. Insbesondere Mehrfach-Transport-Kohlenhydrate (z.B. Glukose-Fruktose im Verhältnis 2:1) ermöglichen durch die Nutzung unterschiedlicher intestinaler Transportmechanismen (SGLT1 und GLUT5) eine erhöhte Aufnahme- und Oxidationsrate von bis zu 1,33 g/min, wodurch größere Mengen effizient verwertet werden können (King et al., 2018). Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass eine weitere Erhöhung der Zufuhr über dieses Optimum hinaus keinen zusätzlichen leistungssteigernden Effekt erzielt und unter Umständen sogar mit negativen Effekten verbunden sein kann. Dieses Phänomen kann als Überdosierungseffekt interpretiert werden und kann unter anderem auf eine Limitierung der intestinalen Absorptionskapazität sowie auf eine verstärkte Beanspruchung endogener Energiespeicher zurückgeführt werden (King et al., 2018; King et al., 2019). Die Studien von King et al. (2018, 2019) deuten darauf

hin, dass bereits geringfügige Überschreitungen (z. B. 100 g/h statt 90 g/h) mit ungünstigeren Leistungswerten im abschließenden Zeitfahren assoziiert sein könnten. Als mögliche Erklärung diskutieren die Autoren eine Limitierung der intestinalen Absorptionskapazität sowie metabolische Verschiebungen, darunter eine reduzierte Fettoxidation und eine erhöhte Nutzung muskulärer Glykogenspeicher.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist der Unterschied zwischen kontrollierten Laborbedingungen und praxisnahen Feldbedingungen. Während unter standardisierten Bedingungen Zufuhrmengen um 90 g/h mit besonders günstigen Leistungswerten verbunden sind (King et al., 2018), zeigen Untersuchungen unter realen Wettkampfbedingungen, dass auch sehr hohe Kohlenhydratzufuhrmengen von 120 g/h toleriert werden können (Viribay et al., 2020). Voraussetzung hierfür ist eine entsprechende physiologische Anpassung, wie sie durch ein vierwöchiges, Darmtraining erreicht wird (Viribay et al., 2020). Dies deutet darauf hin, dass die individuelle Anpassungsfähigkeit des gastrointestinalen Systems eine entscheidende Rolle für die praktische Umsetzung hoher Zufuhrstrategien spielt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass positive Effekte sehr hoher Zufuhrmengen bislang nur in wenigen Studien und unter spezifischen Bedingungen untersucht wurden, sodass ihre Übertragbarkeit auf andere Populationen und Belastungsszenarien derzeit nur eingeschränkt beurteilt werden kann.

Neben den leistungsbezogenen Effekten verdeutlichen die Ergebnisse auch die Bedeutung der Dosierung für regenerative Prozesse. Einzelne Studien, insbesondere Viribay et al. (2020), zeigen, dass höhere Kohlenhydratzufuhrmengen (120 g/h) im Vergleich zu moderaten Mengen (90 g/h) mit einer Reduktion von Markern für Muskelschädigung assoziiert sein können. Zudem dämpft eine ausreichende Kohlenhydratverfügbarkeit (60 g/h vs. Placebo) die hormonelle Stressreaktion, insbesondere den Anstieg der Cortisol- und Adrenalin Spiegel während und nach der Belastung (Ramonas et al., 2023; Newell et al., 2018). Dies lässt sich insbesondere durch eine schnellere Glykogenresynthese sowie durch eine stabilere metabolische und hormonelle Regulation nach der Belastung erklären. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass hohe Zufuhrmengen die gastrointestinale Verträglichkeit limitieren können, wie in einzelnen Studien berichtet wurde (z. B. Oosthuyse et al., 2015; Podlogar et al., 2026). Insbesondere bei Überschreiten der individuellen Absorptionskapazität oder bei Verwendung schwer verdaulicher Substrate wie

Isomaltulose treten vermehrt Beschwerden wie Übelkeit oder Magen-Darm-Probleme auf. Diese Symptome können die Leistungsfähigkeit indirekt negativ beeinflussen (Oosthuysen et al., 2015; Podlogar et al., 2026). Somit ergibt sich ein Spannungsfeld zwischen maximaler Energieverfügbarkeit und individueller Verträglichkeit, das bei der praktischen Umsetzung berücksichtigt werden muss. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass dieser Bereich nicht als universell gültig interpretiert werden kann, da Belastungsdauer, Intensität, Trainingsstatus, Kohlenhydrattyp und individuelle gastrointestinale Verträglichkeit die optimale Zufuhrstrategie maßgeblich beeinflussen können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Dosierung der Kohlenhydratzufuhr einen wichtigen Einflussfaktor für die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration darstellt. Insgesamt deutet die Evidenz auf einen potenziell günstigen Bereich zwischen etwa 90 und 120 g/h hin, wobei höhere Mengen insbesondere unter praxisnahen Bedingungen und nach vorherigem Darmtraining relevant erscheinen. Gleichzeitig sind sowohl zu niedrige als auch individuell nicht tolerierte hohe Zufuhrmengen mit Einschränkungen verbunden.

5.2.2 Timing der Kohlenhydratzufuhr

Neben der Dosierung stellt das Timing der Kohlenhydratzufuhr (CHO) einen zentralen Einflussfaktor dar, dessen Wirkung jedoch differenziert in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Aufnahme betrachtet werden muss. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Timing weniger als isolierter Leistungstreiber während der Belastung fungiert, sondern primär als strategisches Management-Instrument, um metabolische Risiken zu minimieren und die regenerative Kapazität zu maximieren.

Vor der Belastung (Pre-Exercise):

Die akute Kohlenhydratzufuhr vor der Belastung zielt primär darauf ab, die Verfügbarkeit exogener Energie bereits zu Beginn der Belastung zu erhöhen und insbesondere die Leberglykogenspeicher nach einer nächtlichen Fastenperiode aufzufüllen (Learsi et al., 2019). Die analysierten Studien verdeutlichen hierbei ein metabolisches Spannungsfeld: Einerseits verbessert eine kohlenhydratreiche Mahlzeit die energetische Ausgangslage, andererseits können hohe Zufuhrmengen unmittelbar

vor dem Start eine reaktive Hypoglykämie begünstigen (Learsi et al., 2019). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine längere Fastenperiode zwar die Leberglykogenspeicher deutlich reduziert, die Glykogenvorräte in der Muskulatur jedoch weitgehend erhalten bleiben (Learsi et al., 2019). Die akute Zufuhr vor oder während der Belastung dient daher primär der Stabilisierung der Blutglukosekonzentration sowie der Schonung der verbleibenden hepatischen Reserven.

Dieser Abfall des Blutzuckerspiegels lässt sich physiologisch durch eine erhöhte Insulinantwort in Kombination mit der erhöhten Glukoseaufnahme während der Belastung erklären (Learsi et al., 2019). Ein wesentlicher Befund für die Praxis ist jedoch die Kompensationsfähigkeit: Eine adäquate Zufuhr während der Belastung kann die negativen Effekte eines fehlenden Frühstücks (Nüchternzustand) im Hinblick auf die Zeitfahrleistung fast vollständig ausgleichen (Learsi et al., 2019). Das Timing vor der Belastung ist somit als unterstützender, jedoch nicht als allein entscheidender Faktor für die Leistungsfähigkeit einzuordnen, sofern während der Belastung eine kontinuierliche Strategie verfolgt wird.

Während der Belastung (Intra-Exercise):

Hinsichtlich der zeitlichen Verteilung während der Belastung zeigen die Ergebnisse konsistent, dass das exakte Zufuhrschema (z. B. konstante vs. variable Strategien) bei moderaten Belastungsdauern (2–3 h) keinen signifikanten Einfluss auf die Endleistung hat (Schweitzer et al., 2009; Podlogar et al., 2026). Unabhängig davon, ob Kohlenhydrate gleichmäßig (CON), abnehmend (DEC) oder zunehmend (INC) aufgenommen wurden, konnten keine Unterschiede in der Time-Trial-Leistung beobachtet werden (Schweitzer et al., 2009; Podlogar et al., 2026). Dies deutet darauf hin, dass für die akute energetische Absicherung primär die Gesamtmenge der zugeführten Kohlenhydrate entscheidend ist. Gleichzeitig relativieren diese Befunde die Annahme, dass komplexe Timing-Schemata per se leistungssteigernd wirken.

Dennoch zeigen sich relevante Unterschiede auf physiologischer Ebene, die das Timing als Werkzeug zur Sicherung der gastrointestinalen (GI) Verträglichkeit definieren. Ein abnehmendes Schema (DEC) begünstigt laut Podlogar et al. (2026) die exogene CHO-Oxidation im Vergleich zu ansteigenden Mustern. Besonders kritisch erwiesen sich steigende Zufuhrmuster (INC), die gegen Ende der Belastung zu

signifikant höherer Übelkeit und Magenkrämpfen führten (Podlogar et al., 2026). Ein möglicher Erklärungsansatz für diesen Befund ist die belastungsinduzierte Reduktion der Durchblutung des Verdauungstrakts: Da der Verdauungstrakt bei fortschreitender Ermüdung schlechter durchblutet wird, sinkt die Absorptionskapazität, wodurch hohe Kohlenhydratboli in der Spätphase der Belastung schlechter toleriert werden (Podlogar et al., 2026). Das Timing während der Belastung kann daher insbesondere als Strategie zur Unterstützung der gastrointestinalen Verträglichkeit betrachtet werden.

Nach der Belastung (Post-Exercise / Regeneration):

Im Gegensatz zur Phase während der Belastung stellt das Timing nach dem Sport eine wichtige Variable für die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit dar. Eine frühzeitige Kohlenhydratzufuhr unmittelbar nach Belastungsende nutzt die frühe Phase erhöhter Glykogenresynthese optimal aus (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass hierbei das Zusammenspiel von Timing und biochemischer Zusammensetzung entscheidend ist. Maunder et al. (2018) demonstrierten, dass eine kombinierte Zufuhr von Fruktose und Maltodextrin die Ausdauerkapazität für eine Folgebildung innerhalb von nur vier Stunden um 32,4 % steigern kann. Die physiologische Erklärung liegt in der organspezifischen Wirkung: Während Glukose primär die Sättigung des Muskelglykogens vorantreibt, beschleunigt Fruktose spezifisch die Resynthese des Leberglykogens (Maunder et al., 2018).

Zusätzlich beeinflussen die physikalischen Eigenschaften wie die Molekülgröße den regenerativen Erfolg. Hochmolekulare Glukosepolymere (HMW) ermöglichen aufgrund einer geringeren Osmolalität eine schnellere Magenpassage und führen zu einer schnelleren Verfügbarkeit von Glukose im Blut (Stephens et al., 2008). Dies resultiert in einem um 10 % höheren Work-Output in nachfolgenden Belastungen im Vergleich zu niedermolekularen Polymeren (Stephens et al., 2008). Das Timing nach der Belastung ist somit eine relevante Stellschraube, um die biochemische Wiederherstellung gezielt zu maximieren.

Zusammenfassende Einordnung:

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Relevanz des Timings stark vom Belastungskontext abhängt. Während die prä-exercise Zufuhr primär der Sicherung der energetischen Ausgangslage dient (Learsi et al., 2019) und die Verteilung während

der Belastung primär den GI-Komfort sichert (Podlogar et al., 2026), kommt der frühen post-exercise Phase eine zentrale Rolle für die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit zu (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008). Damit wird deutlich, dass das Timing der Kohlenhydratzufuhr insbesondere im Kontext der Regeneration eine hohe strategische Bedeutung hat.

5.2.3 Kohlenhydrattyp und Darreichungsform

Neben der Dosierung und dem Timing stellt auch der Kohlenhydrattyp einen relevanten Einflussfaktor für die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration dar. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten darauf hin, dass insbesondere die Kombination verschiedener Kohlenhydratquellen funktionelle Vorteile gegenüber Einzelkohlenhydraten aufweisen kann.

Ein zentrales Ergebnis ist die Überlegenheit von Mehrfach-Transport-Kohlenhydraten gegenüber Einzelkohlenhydraten. Mischungen aus Glukose bzw. Maltodextrin und Fruktose ermöglichen durch die Nutzung unterschiedlicher intestinaler Transportmechanismen eine höhere Aufnahme- und Oxidationsrate im Vergleich zu reiner Glukose (King et al., 2018). Diese effizientere Substratverfügbarkeit verbessert die energetische Versorgung während der Belastung und erhöht die Wahrscheinlichkeit einer verbesserten Leistungsfähigkeit.

Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse, dass alternative Kohlenhydratquellen wie Isomaltulose mit Nachteilen verbunden sein können. Die verzögerte Resorption führt zu einer geringeren Verfügbarkeit exogener Energie während der Belastung, was sich negativ auf die Leistungsfähigkeit auswirken kann (Oosthuyse et al., 2015). Gleichzeitig ist die Verwendung solcher Substrate mit einer erhöhten gastrointestinalen Belastung verbunden, was ihre praktische Anwendbarkeit zusätzlich einschränkt (Oosthuyse et al., 2015).

Neben der Art der Kohlenhydrate spielt auch deren strukturelle Beschaffenheit eine Rolle, insbesondere im Kontext der Regeneration. Hochmolekulare Glukosepolymere ermöglichen eine schnellere Magenpassage und damit eine raschere Verfügbarkeit von Glukose im Blut, was mit einer verbesserten Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit assoziiert ist (Stephens et al., 2008).

Ein weiterer relevanter Aspekt ist die Kombination verschiedener Kohlenhydrate in der Regenerationsphase. Die Ergebnisse zeigen, dass Mischungen aus Fruktose und

Glukose bzw. Maltodextrin die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit effektiver unterstützen können als Einzelkohlenhydrate (Maunder et al., 2018). Dies lässt sich dadurch erklären, dass unterschiedliche Kohlenhydrate verschiedene Speicher (Muskel- und Leberglykogen) gezielt auffüllen und somit eine schnellere funktionelle Regeneration ermöglichen (Maunder et al., 2018).

Im Gegensatz zum Kohlenhydrattyp zeigen die Ergebnisse keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Darreichungsform. Ob Kohlenhydrate in flüssiger Form, als Gel oder in fester Form aufgenommen werden, scheint keinen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit zu haben (Campbell et al., 2008). Dies deutet darauf hin, dass die Wahl der Darreichungsform primär nach praktischen und individuellen Präferenzen erfolgen kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Kohlenhydrattyp einen relevanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Regeneration ausübt, wobei insbesondere Mehrfach-Transport-Kohlenhydrate funktionelle Vorteile gegenüber Einzelkohlenhydraten aufweisen können. Die Darreichungsform hingegen spielt eine untergeordnete Rolle und ist vor allem für die praktische Umsetzung von Bedeutung.

Damit zeigt die Diskussion, dass der Einfluss der Kohlenhydratzufuhr nicht isoliert über einzelne Faktoren erklärt werden kann, sondern aus dem Zusammenspiel von Dosierung, Timing, Kohlenhydrattyp sowie individuellen und belastungsspezifischen Rahmenbedingungen resultiert. Dabei wurde deutlich, dass insbesondere die Dosierung und die frühe post-exercise-Zufuhr eine zentrale Bedeutung für Leistungsfähigkeit und Regeneration besitzen, während weitere Faktoren kontextabhängig zu bewerten sind.

Auf Grundlage dieser Einordnung werden im folgenden Kapitel methodische Limitationen der Arbeit reflektiert und Schlussfolgerungen für die Bewertung der Ergebnisse abgeleitet.

6. Methodische Einordnung und Limitationen

Dieses Kapitel reflektiert die methodischen Grenzen der vorliegenden Arbeit und ordnet potenzielle Einschränkungen bei der Interpretation und Übertragbarkeit der Ergebnisse kritisch ein. Dabei werden sowohl Limitationen der eingeschlossenen

Primärstudien als auch methodische Herausforderungen des systematischen Reviews berücksichtigt.

Im Fokus stehen insbesondere Aspekte der Stichprobencharakteristika, der Heterogenität der Studiendesigns, der Übertragbarkeit von Labor- auf Feldbedingungen sowie Einschränkungen hinsichtlich Belastungsdauer und Outcomeerhebung. Auf dieser Grundlage werden Implikationen für die Bewertung der Ergebnisse sowie Ansatzpunkte für zukünftige Forschung abgeleitet.

6.1 Stichprobencharakteristika und Generalisierbarkeit

Ein zentraler Aspekt betrifft die Stichprobengröße der eingeschlossenen Studien. Die meisten Untersuchungen basieren auf kleinen Stichproben ($n = 8$ bis $n = 20$), was die statistische Aussagekraft einschränken und die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Populationen limitieren kann. Zudem bestand die untersuchte Population überwiegend aus männlichen, ausdauertrainierten Probanden, während weibliche Athletinnen trotz teilweise geschlechtsunabhängiger Rekrutierung in der Gesamtevidenz unterrepräsentiert bleiben. Dies schränkt die Übertragbarkeit der metabolischen Reaktionen auf Frauen sowie auf weniger trainierte Personen ein.

6.2 Heterogenität der Studiendesigns und Testverfahren

Ein weiterer limitierender Faktor ist die Heterogenität der Studiendesigns. Obwohl überwiegend randomisierte Crossover-Studien eingeschlossen wurden, unterscheiden sich die Untersuchungen hinsichtlich der Belastungsprotokolle, der Belastungsdauer sowie der Ernährungszustände vor Studienbeginn. Zudem ist die Vergleichbarkeit der Leistungsparameter durch unterschiedliche Testverfahren eingeschränkt. Während Time-Trial-Tests (TT) eine hohe ökologische Validität aufweisen, gelten Time-to-Exhaustion-Protokolle (TTE) als weniger reliabel und weniger praxisnah. Unterschiede in den berichteten Leistungsverbesserungen könnten daher teilweise auf diese methodischen Differenzen zurückzuführen sein (Learsi et al., 2019; Schweitzer et al., 2009).

6.3 Labor- vs. Feldbedingungen und Darmtraining

Darüber hinaus wurden die meisten Studien unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt. Diese ermöglichen zwar eine hohe interne Validität durch standardisierte Belastungen, bilden jedoch reale Wettkampfsituationen nur eingeschränkt ab. Feldstudien zeigen hingegen, dass unter praxisnahen Bedingungen zusätzliche Einflussfaktoren wie Umweltbedingungen, Renndynamik oder individuelle Ernährungsstrategien eine Rolle spielen, die in Laborstudien häufig nicht vollständig berücksichtigt werden können (Viribay et al., 2020). In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass in einzelnen Studien sehr hohe Kohlenhydratzufuhrmengen (z. B. 120 g/h) unter der Voraussetzung eines vorherigen Darmtrainings untersucht wurden (Viribay et al., 2020). Dies kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse einschränken, da untrainierte Personen diese Mengen möglicherweise nicht ohne signifikante gastrointestinale Beschwerden tolerieren können.

6.4 Belastungsdauer und Akut-Effekte

Ein weiterer Aspekt betrifft die Belastungsdauer der untersuchten Protokolle. Ein Großteil der Studien analysierte Belastungen im Bereich von zwei bis drei Stunden, wodurch Aussagen für sehr lange Ausdauerbelastungen, wie beispielsweise Ultra-Endurance-Events, nur eingeschränkt möglich sind (King et al., 2018; Podlogar et al., 2026). Gleichzeitig könnten bei kürzeren Belastungsdauern andere physiologische Mechanismen, wie beispielsweise das sogenannte „Oral Sensing“, eine größere Rolle spielen, was die Übertragbarkeit auf längere Belastungen zusätzlich einschränken kann (Podlogar., 2026). Zudem untersuchten die analysierten Studien primär akute Effekte der Kohlenhydratzufuhr, während langfristige Anpassungsprozesse oder chronische Ernährungsstrategien nicht im Fokus standen.

6.5 Methodik der Outcome-Bestimmung

Eine wesentliche methodische Limitation betrifft die Erhebungsmethoden der metabolischen Outcomes. Die Bestimmung zentraler Prozesse, insbesondere der Glykogenverfügbarkeit, erfolgte in den meisten Studien indirekt. Da keine direkten Muskelbiopsien durchgeführt wurden, basieren Aussagen zur Glykogenersparnis oder

-resynthese überwiegend auf Verfahren wie der indirekten Kalorimetrie oder stabilen Isotopenmethoden (Maunder et al., 2018; Ramonas et al., 2023). Diese Verfahren können die tatsächliche Verteilung der Substrate im Gewebe sowie die zugrunde liegenden metabolischen Prozesse nur eingeschränkt abbilden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse trotz der genannten Limitationen konsistente Muster aufzeigen, deren Übertragbarkeit jedoch stark vom jeweiligen Kontext abhängt. Zukünftige Studien sollten insbesondere größere und heterogenere Stichproben einbeziehen, direkte Messmethoden zur Bestimmung metabolischer Prozesse nutzen sowie vermehrt praxisnahe Bedingungen berücksichtigen, um die Aussagekraft der Ergebnisse weiter zu erhöhen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Literaturrecherche auf zwei Datenbanken sowie auf englischsprachige Publikationen beschränkt war, wodurch ein potenzieller Publikations- und Sprachbias nicht ausgeschlossen werden kann.

Insgesamt stellt die vorliegende Arbeit dennoch eine strukturierte Einordnung der aktuellen Evidenz dar und verdeutlicht den Bedarf an weiterer Forschung, insbesondere unter praxisnahen Bedingungen und mit methodisch erweiterten Untersuchungsansätzen.

Auf Grundlage dieser Einordnung werden im folgenden Kapitel die praktischen Konsequenzen für die Gestaltung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport dargestellt.

7. Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis

Dieses Kapitel leitet aus den diskutierten Befunden konkrete Empfehlungen für die praktische Gestaltung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport ab. Ziel ist es, die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Dosierung, Timing und Kohlenhydrattyp in anwendungsorientierte Empfehlungen für Training und Wettkampf zu überführen. Im Fokus stehen dabei Empfehlungen zur bedarfsgerechten Umsetzung von Kohlenhydratstrategien in Abhängigkeit von Belastungsdauer, Intensität und individuellen Voraussetzungen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit liefern mehrere praxisrelevante Erkenntnisse für die Gestaltung der Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport. Dabei wird deutlich, dass sowohl Dosierung, Timing als auch die Wahl des Kohlenhydrattyps gezielt an die jeweilige Belastungssituation angepasst werden sollten.

Ein zentraler praktischer Befund betrifft die Dosierung der Kohlenhydratzufuhr. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Zufuhrmengen unterhalb von etwa 30–40 g/h für längere Ausdauerbelastungen nicht ausreichend sind, um die Leistungsfähigkeit signifikant zu unterstützen (Newell et al., 2018). Für Belastungsdauern von mehr als zwei Stunden lässt sich ein praxisrelevanter Bereich von etwa 60–90 g/h ableiten, um eine ausreichende exogene Energieversorgung während der Belastung sicherzustellen (King et al., 2018, 2019). Bei sehr langen oder intensiven Belastungen kann unter spezifischen Bedingungen (z. B. bei trainierter gastrointestinaler Verträglichkeit) eine Steigerung auf bis zu 120 g/h zusätzliche Vorteile bieten. In diesem Zusammenhang kommt dem gezielten „Darmtraining“ eine besondere Bedeutung zu, da eine schrittweise Anpassung des gastrointestinalen Systems die Toleranz gegenüber hohen Zufuhrmengen verbessern kann (Viribay et al., 2020).

Hinsichtlich des Timings der Kohlenhydratzufuhr zeigen die Ergebnisse, dass der Zeitpunkt der Aufnahme differenziert betrachtet werden muss. Eine Kohlenhydratzufuhr vor der Belastung kann insbesondere nach einer nächtlichen Fastenphase dazu beitragen, die Ausgangssituation zu stabilisieren, ist für die Leistungsfähigkeit von untergeordneter Bedeutung, sofern während der Belastung eine ausreichende Zufuhr erfolgt (Learsi et al., 2019). Während der Belastung sollte der Fokus auf einer kontinuierlichen und gut verträglichen Zufuhr liegen, wobei die

genaue Verteilung der Aufnahme eine untergeordnete Rolle spielt (Schweitzer et al., 2009; Podlogar et al., 2026). Entscheidend ist vielmehr die Gesamtmenge sowie die individuelle Verträglichkeit. Eine zu späte oder stark ansteigende Zufuhr sollte vermieden werden, da sie insbesondere in der Endphase der Belastung mit einem erhöhten Risiko für gastrointestinale Beschwerden verbunden ist (Podlogar et al., 2026).

Die größte praktische Relevanz des Timings zeigt sich eindeutig in der Phase nach der Belastung. Eine frühzeitige Kohlenhydratzufuhr unmittelbar nach Belastungsende sollte gezielt eingeplant werden, da sie entscheidend für eine schnelle Glykogenresynthese und die Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit ist (Maunder et al., 2018; Stephens et al., 2008). Besonders relevant ist dies für Athletinnen und Athleten mit kurzen Regenerationszeiten zwischen zwei Belastungen, wie beispielsweise in Wettkampfsituationen oder intensiven Trainingsphasen. In diesen Fällen sollte die Kohlenhydratzufuhr unmittelbar nach Belastungsende priorisiert werden, um die Glykogenresynthese frühzeitig zu initiieren und die Leistungsfähigkeit für nachfolgende Belastungen zu sichern (Maunder et al., 2018).

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Praxis ist die Wahl des Kohlenhydrattyps. Die Ergebnisse zeigen, dass Mehrfach-Transport-Kohlenhydrate, insbesondere Kombinationen aus Glukose bzw. Maltodextrin und Fruktose, gegenüber Einzelkohlenhydraten Vorteile hinsichtlich der Aufnahme und Oxidation bieten (King et al., 2018; Maunder et al., 2018). Diese sollten daher bevorzugt eingesetzt werden, um die Energieverfügbarkeit während der Belastung zu optimieren und gleichzeitig die Regeneration zu unterstützen. Gleichzeitig ist die Auswahl der Kohlenhydratquelle an die individuelle Verträglichkeit anzupassen, da bestimmte Substrate mit gastrointestinalen Beschwerden assoziiert sein können (Oosthuyse et al., 2015). Im Gegensatz dazu spielt die Darreichungsform der Kohlenhydrate eine untergeordnete Rolle. Ob Kohlenhydrate in flüssiger, halbflüssiger oder fester Form aufgenommen werden, hat keinen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit, solange die Zufuhrmenge vergleichbar ist (Campbell et al., 2008). Die Wahl sollte daher flexibel an individuelle Präferenzen, praktische Umsetzbarkeit und die jeweilige Sportart angepasst werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die optimale Kohlenhydratzufuhr je nach Belastungsdauer und -intensität unterscheidet. Während bei kürzeren Belastungen (< 60–90 min) geringere Zufuhrmengen oder sogar

Strategien wie eine KohlenhydratMundspülung („Oral Sensing“) ausreichend sein können (Learsi et al., 2019; Ramonas et al., 2023), gewinnen bei längeren Belastungen kontinuierliche Zufuhrstrategien zunehmend an Bedeutung (Podlogar et al., 2026).

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass eine optimale Kohlenhydratzufuhr im Ausdauersport ein individualisiertes Konzept erfordert, das Dosierung, Timing und Kohlenhydrattyp integriert und an Belastungsdauer, Intensität sowie individuelle Verträglichkeit angepasst wird (King et al., 2018; Viribay et al., 2020; Podlogar et al., 2026). Durch eine gezielte Umsetzung dieser Strategien können sowohl die Leistungsfähigkeit während der Belastung als auch die Regeneration verbessert werden (Maunder et al., 2018; Newell et al., 2018).

Die vorliegenden Erkenntnisse verdeutlichen, wie wissenschaftliche Evidenz in konkrete Handlungsempfehlungen für die Trainings- und Wettkampfpraxis überführt werden kann.

Im folgenden Kapitel werden die zentralen Erkenntnisse der Arbeit zusammengeführt und im Rahmen eines Fazits abschließend eingeordnet.

8. Fazit

Dieses Kapitel fasst die zentralen Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf die Forschungsfrage zusammen und verdichtet die wesentlichen Befunde zu einer abschließenden Gesamtbewertung. Dabei werden die wichtigsten Ergebnisse zum Einfluss von Timing und Dosierung der Kohlenhydratzufuhr auf Leistungsfähigkeit und Regeneration zusammengeführt.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss des Timings und der Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit sowie auf regenerative Prozesse bei ausdauertrainierten Erwachsenen systematisch zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Dosierung als auch das Timing der Kohlenhydratzufuhr einen nachweisbaren Einfluss auf objektive Leistungs- und Regenerationsparameter ausüben, wobei die Wirkung stark vom Belastungskontext und individuellen Voraussetzungen abhängt. Hinsichtlich der Dosierung konnte ein konsistenter Zusammenhang identifiziert werden: Während geringe Zufuhrmengen keine relevanten Effekte zeigen, sind insbesondere moderate bis hohe Mengen (60–90 g/h) mit konsistenten Verbesserungen der Leistungsfähigkeit sowie der Regeneration assoziiert (Newell et al., 2018; King et al., 2018, 2019). Unter spezifischen Bedingungen können auch höhere Zufuhrmengen zusätzliche Vorteile bieten, wobei die individuelle gastrointestinale Verträglichkeit eine entscheidende Rolle spielt (Viribay et al., 2020).

Bezüglich des Timings zeigt sich ein differenziertes Bild. Die Kohlenhydratzufuhr vor der Belastung hat eine unterstützende, jedoch keine entscheidende Wirkung auf die Leistungsfähigkeit, sofern während der Belastung eine ausreichende Zufuhr erfolgt (Learsi et al., 2019). Während der Belastung ist vor allem die kontinuierliche Bereitstellung von Kohlenhydraten relevant, während die genaue zeitliche Verteilung eine untergeordnete Rolle spielt (Schweitzer et al., 2009; Podlogar et al., 2026). Die größte Bedeutung kommt der frühen Phase nach der Belastung zu, in der eine zeitnahe Kohlenhydratzufuhr entscheidend zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit und zur Optimierung regenerativer Prozesse beiträgt (Mauder et al., 2018; Stephens et al., 2008).

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass Mehrfach-Transport-Kohlenhydrate gegenüber Einzelkohlenhydraten metabolische Vorteile aufweisen und somit sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Regeneration positiv beeinflussen können (King et al., 2018; Maunder et al., 2018), während die Darreichungsform eine untergeordnete Rolle spielt (Campbell et al., 2008).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Effekte der Kohlenhydratzufuhr nicht isoliert betrachtet werden können, sondern im Zusammenspiel von Dosierung, Timing, Kohlenhydrattyp und individueller Verträglichkeit stehen. Die vorliegende Arbeit beantwortet die Forschungsfrage dahingehend, dass sowohl Zeitpunkt als auch Menge der Kohlenhydratzufuhr entscheidend zur Optimierung von Leistungsfähigkeit und Regeneration beitragen, wobei insbesondere die Dosierung während der Belastung (Newell et al., 2018; King et al., 2018) und die frühe postexercise Phase (Stephens et al., 2008; Maunder et al., 2018) als zentrale Einflussfaktoren hervorzuheben sind.

Abschließend zeigt die Arbeit, dass eine gezielte und kontextabhängige Steuerung der Kohlenhydratzufuhr eine zentrale Rolle im Ausdauersport einnimmt und eine evidenzbasierte Grundlage für zukünftige Forschung sowie für die praktische Anwendung in Training und Wettkampf darstellt.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden im folgenden Kapitel weiterführende Perspektiven für zukünftige Forschung sowie mögliche Entwicklungen für die praktische Anwendung aufgezeigt.

9. Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet eine systematische Einordnung der aktuellen Evidenz zum Einfluss von Timing und Dosierung der akuten Kohlenhydratzufuhr auf die sportliche Leistungsfähigkeit und Regeneration. Dennoch ergeben sich aus den Ergebnissen mehrere Ansatzpunkte für zukünftige Forschung.

Ein zentraler Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf unterschiedliche Populationen. Die eingeschlossenen Studien basieren überwiegend auf männlichen, ausdauertrainierten Probanden, sodass insbesondere geschlechtsspezifische Unterschiede sowie Effekte bei weniger trainierten oder heterogeneren Gruppen bislang unzureichend untersucht sind (Maunder et al., 2018; Podlogar et al., 2026).

Zukünftige Studien sollten daher gezielt diversere Stichproben einbeziehen, um die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen.

Darüber hinaus erscheint eine stärkere Berücksichtigung praxisnaher Belastungsszenarien notwendig. Ein Großteil der bisherigen Evidenz basiert auf kontrollierten Laborstudien (King et al., 2018; Newell et al., 2018), während reale Wettkampfbedingungen mit variierenden Umweltfaktoren, Ernährungsstrategien und Belastungsprofilen bislang nur eingeschränkt abgebildet werden. Feldstudien könnten hier einen wichtigen Beitrag leisten, um die Anwendbarkeit der Ergebnisse im sportlichen Alltag weiter zu validieren (Viribay et al., 2020).

Ein weiterer relevanter Aspekt betrifft die Individualisierung der Kohlenhydratzufuhr. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass insbesondere die gastrointestinale Verträglichkeit sowie die Anpassungsfähigkeit des Verdauungssystems („Darmtraining“) eine entscheidende Rolle für die praktische Umsetzung spielen (Viribay et al., 2020; Podlogar et al., 2026). Zukünftige Forschung sollte daher verstärkt untersuchen, wie individuelle Unterschiede systematisch berücksichtigt und in personalisierte Ernährungsstrategien überführt werden können.

Zusätzlich besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der langfristigen Auswirkungen wiederholter akuter Kohlenhydratzufuhrstrategien. Während die vorliegende Arbeit primär kurzfristige Effekte betrachtet, könnten längerfristige Anpassungsprozesse

sowie Wechselwirkungen mit Trainingsperiodisierung und Ernährungsstrategien einen weiteren wichtigen Erkenntnisgewinn liefern (Ramonas et al., 2023).

Insgesamt verdeutlicht der Ausblick, dass trotz der bereits gut belegten Bedeutung von Timing und Dosierung der Kohlenhydratzufuhr weiterhin Potenzial für vertiefende Untersuchungen besteht, insbesondere im Hinblick auf Individualisierung, Praxisnähe und langfristige Effekte. Die vorliegende Arbeit unterstreicht die zentrale Bedeutung einer evidenzbasierten und kontextabhängigen Kohlenhydratstrategie als wesentlichen Bestandteil leistungs- und regenerationsorientierter Ernährungskonzepte im Ausdauersport.

10. Literaturverzeichnis

Alle im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Onlinequellen wurden am 13. Mai 2026 erneut aufgerufen und hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit sowie inhaltlichen Übereinstimmung überprüft. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass sämtliche zitierten Inhalte weiterhin zugänglich sind und den in der Arbeit dargestellten Informationen entsprechen.

Adeva-Andany, M. M., González-Lucán, M., Donapetry-García, C., Fernández-Fernández, C., & Ameneiros-Rodríguez, E. (2016). Glycogen metabolism in humans. *BBA Clinical*, 5, 85–100. <https://doi.org/10.1016/j.bbacli.2016.02.001>

Amawi, A., AlKasasbeh, W., Jaradat, M., Almasri, A., Alobaidi, S., Abu Hammad, A., Bishtawi, T., Fataftah, B., Turk, N., Al Saoud, H., Jarrar, A., & Ghazzawi, H. (2024). Athletes' nutritional demands: A narrative review of nutritional requirements. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1331854. <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1331854>

Bergström, J., & Hultman, E. (1966). Muscle glycogen synthesis after exercise: An enhancing factor localized to the muscle cells in man. *Nature*, 210(5033), 309–310. <https://doi.org/10.1038/210309a0>

Bergström, J., & Hultman, E. (1967). A study of glycogen metabolism during exercise in man. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*, 19(3), 218–228. <https://doi.org/10.3109/00365516709090629>

Brooks, G. A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: The crossover concept. *Journal of Applied Physiology*, 76(6), 2253–2261. <https://doi.org/10.1152/jappl.1994.76.6.2253>

Burke, L. M., & Hawley, J. A. (2002). Effects of short-term fat adaptation on metabolism and performance of prolonged exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(9), 1492–1498. <https://doi.org/10.1097/00005768-200209000-00015>

Burke, L. M., & Hawley, J. A. (2018). Swifter, higher, stronger: What's on the menu? *Science*, 362(6416), 781–787. <https://doi.org/10.1126/science.aau2093>

Burke, L. M., Hawley, J. A., Wong, S. H. S., & Jeukendrup, A. E. (2011). Carbohydrates for training and competition. *Journal of Sports Sciences*, 29(Suppl. 1), S17–S27. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.585473>

Burke, L. M., van Loon, L. J. C., & Hawley, J. A. (2017). Postexercise muscle glycogen resynthesis in humans. *Journal of Applied Physiology*, 122(5), 1055–1067. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00860.2016>

Campbell, C., Prince, D., Braun, M., Applegate, E., & Casazza, G. A. (2008). Carbohydrate-supplement form and exercise performance. *International Journal of*

Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 18(2), 179–190.
<https://doi.org/10.1123/ijsnem.18.2.179>

Coyle, E. F. (1995). Substrate utilization during exercise in active people. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 61(4 Suppl.), 968S–979S.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/61.4.968S>

Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hemmert, M. K., & Ivy, J. L. (1986). Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *Journal of Applied Physiology*, 61(1), 165–172. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.61.1.165>

Cummings, J. H., & Stephen, A. M. (2007). Carbohydrate terminology and classification. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(Suppl. 1), S5–S18.
<https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602936>

Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(2), 275–281. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31815adf19>

de Morton, N. A. (2009). The PEDro scale is a valid measure of the methodological quality of clinical trials: A demographic study. *Australian Journal of Physiotherapy*, 55(2), 129–133. [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(09\)70043-1](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(09)70043-1)

Febbraio, M. A., Chiu, A., Angus, D. J., Arkinstall, M. J., & Hawley, J. A. (2000). Effects of carbohydrate ingestion before and during exercise on glucose kinetics and performance. *Journal of Applied Physiology*, 89(6), 2220–2226.
<https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.6.2220>

Gastin, P. B. (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*, 31(10), 725–741.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00003>

Gleeson, M., Nieman, D. C., & Pedersen, B. K. (2004). Exercise, nutrition and immune function. *Journal of Sports Sciences*, 22(1), 115–125.
<https://doi.org/10.1080/0264041031000140590>

Gladden, L. B. (2004). Lactate metabolism: A new paradigm for the third millennium. *The Journal of Physiology*, 558(1), 5–30. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.058701>

Gorboulev, V., Schürmann, A., Vallon, V., Kipp, H., Jaschke, A., Klessen, D., Friedrich, A., Scherneck, S., Rieg, T., Cunard, R., Veyhl-Wichmann, M., Srinivasan, A., Balen, D., Breljak, D., Rexhepaj, R., Parker, H. E., Gribble, F. M., Reimann, F., Lang, F., Wiese, S., Sabolić, I., Sendtner, M., & Koepsell, H. (2012). Na⁺-D-glucose cotransporter SGLT1 is pivotal for intestinal glucose absorption and glucose-dependent incretin secretion. *Diabetes*, 61(1), 187–196. <https://doi.org/10.2337/db11-1029>

Hansen, A. K., Fischer, C. P., Plomgaard, P., Andersen, J. L., Saltin, B., & Pedersen, B. K.

(2005). Skeletal muscle adaptation: Training twice every second day vs. training once daily.

Journal of Applied Physiology, 98(1), 93–99.

<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00163.2004>

Hargreaves, M., & Spriet, L. L. (2018). Exercise metabolism: Fuels for the fire. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 8(8), a029744.

<https://doi.org/10.1101/cshperspect.a029744>

Hawley, J. A., & Burke, L. M. (2010). Carbohydrate availability and training adaptation: Effects on cell metabolism. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 38(4), 152–160. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e3181f44dd9>

Hawley, J. A., & Leckey, J. J. (2015). Carbohydrate dependence during prolonged, intense endurance exercise. *Sports Medicine*, 45(Suppl. 1), S5–S12.

<https://doi.org/10.1007/s40279-015-0400-1>

Hearris, M. A., Hammond, K. M., Fell, J. M., & Morton, J. P. (2018). Regulation of muscle glycogen metabolism during exercise: Implications for endurance performance and training adaptations. *Nutrients*, 10(3), 298.

<https://doi.org/10.3390/nu10030298>

Impey, S. G., Hearris, M. A., Hammond, K. M., Bartlett, J. D., Louis, J. B., Close, G. L., & Morton, J. P. (2018). Fuel for the work required: A theoretical framework for carbohydrate periodization and the glycogen threshold hypothesis. *Sports Medicine*, 48(5), 1031–1048. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0867-7>

Ivy, J. L., Katz, A. L., Cutler, C. L., Sherman, W. M., & Coyle, E. F. (1988). Muscle glycogen synthesis after exercise: Effect of time of carbohydrate ingestion. *Journal of Applied Physiology*, 64(4), 1480–1485. <https://doi.org/10.1152/jappl.1988.64.4.1480>

Jensen, T. E., & Richter, E. A. (2012). Regulation of glucose and glycogen metabolism during and after exercise. *The Journal of Physiology*, 590(5), 1069–1076.

<https://doi.org/10.1113/jphysiol.2011.224972>

Jeukendrup, A. E. (2011). Nutrition for endurance sports: Marathon, triathlon, and road cycling. *Journal of Sports Sciences*, 29(Suppl. 1), S91–S99.

<https://doi.org/10.1080/02640414.2011.610348>

Jeukendrup, A. (2014). A step towards personalized sports nutrition: Carbohydrate intake during exercise. *Sports Medicine*, 44(Suppl. 1), S25–S33.

<https://doi.org/10.1007/s40279-014-0148-z>

Jeukendrup, A. E. (2017). Training the gut for athletes. *Sports Medicine*, 47(Suppl. 1), 101–110. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0690-6>

Kellett, G. L., & Brot-Laroche, E. (2005). Apical GLUT2: A major pathway of intestinal sugar absorption. *Diabetes*, 54(10), 3056–3062.

<https://doi.org/10.2337/diabetes.54.10.3056>

- King, A. J., O'Hara, J. P., Morrison, D. J., Preston, T., & King, R. F. G. J. (2018). Carbohydrate dose influences liver and muscle glycogen oxidation and performance during prolonged exercise. *Physiological Reports*, 6(1), Article e13555. <https://doi.org/10.14814/phy2.13555>
- King, A. J., O'Hara, J. P., Arjomandkhah, N. C., Rowe, J., Morrison, D. J., Preston, T., & King, R. F. G. J. (2019). Liver and muscle glycogen oxidation and performance with dose variation of glucose–fructose ingestion during prolonged (3 h) exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 119(5), 1157–1169. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04106-9>
- Learsi, S. K., Ghiarone, T., Silva-Cavalcante, M. D., Andrade-Souza, V. A., Ataíde-Silva, T., Bertuzzi, R., de Araujo, G. G., McConell, G., & Lima-Silva, A. E. (2019). Cycling TT performance is improved by carbohydrate ingestion during exercise regardless of a fed or fasted state. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(5), 651–662. <https://doi.org/10.1111/sms.13393>
- Meeusen, R., Watson, P., Hasegawa, H., Roelands, B., & Piacentini, M. F. (2006). Central fatigue: The serotonin hypothesis and beyond. *Sports Medicine*, 36(10), 881–909. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636100-00006>
- Maunder, E., Podlogar, T., & Wallis, G. A. (2018). Postexercise fructose–maltodextrin ingestion enhances subsequent endurance capacity. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 50(5), 1039–1045. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001516>
- Morton, J. P., Croft, L., Bartlett, J. D., MacLaren, D. P. M., Reilly, T., Evans, L., McArdle, A., & Drust, B. (2009). Reduced carbohydrate availability does not modulate training-induced heat shock protein adaptations but does upregulate oxidative enzyme activity in human skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, 106(5), 1513–1521. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00003.2009>
- Murray, B., & Rosenbloom, C. (2018). Fundamentals of glycogen metabolism for coaches and athletes. *Nutrition Reviews*, 76(4), 243–259. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy001>
- Mora-Flores, L. P., Moreno-Terrazas Casildo, R., Fuentes-Cabrera, J., Pérez-Vicente, H. A., de Anda-Jáuregui, G., & Neri-Torres, E. E. (2023). The role of carbohydrate intake on the gut microbiome: A weight of evidence systematic review. *Microorganisms*, 11(7), 1728. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11071728>
- Newell, M. L., Wallis, G. A., Hunter, A. M., Tipton, K. D., & Galloway, S. D. R. (2018). Metabolic responses to carbohydrate ingestion during exercise: Associations between carbohydrate dose and endurance performance. *Nutrients*, 10(1), Article 37. <https://doi.org/10.3390/nu10010037>
- Oosthuyse, T., Carstens, M., & Millen, A. M. E. (2015). Ingesting isomaltulose versus fructose-maltodextrin during prolonged moderate-heavy exercise increases fat oxidation but impairs gastrointestinal comfort and cycling performance. *International*

Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 25(5), 427–438.
<https://doi.org/10.1123/ijsnem.2014-0178>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Zaltas, E., & Jeukendrup, A. E. (2010). CHO oxidation from a CHO gel compared with a drink during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(11), 2038–2045. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181e0efe6>

Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Hodgson, A. B., Randell, R., Pöttgen, K., Res, P., & Jeukendrup, A. E. (2012). Nutritional intake and gastrointestinal problems during competitive endurance events. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(2), 344–351. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822dc809>

Philp, A., Hargreaves, M., & Baar, K. (2012). More than a store: Regulatory roles for glycogen in skeletal muscle adaptation to exercise. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 302(11), E1343–E1351.
<https://doi.org/10.1152/ajpendo.00004.2012>

Phillips, S. M., & van Loon, L. J. C. (2011). Dietary protein for athletes: From requirements to optimum adaption. *Journal of Sports Sciences*, 29(Suppl. 1), S29–S38. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.619204>

Podlogar, T., & Wallis, G. A. (2022). New horizons in carbohydrate research and application for endurance athletes. *Sports Medicine*, 52(Suppl. 1), S5–S23.
<https://doi.org/10.1007/s40279-022-01757-1>

Podlogar, T., Grmek, B., Pungerčar, L., Cirnski, S., Goršek Šparovec, T., & Rowlands, D. S. (2026). No performance effects of altered carbohydrate distribution during intense cycling. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 36(2), 65–75. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2025-0059>

Ramonas, A., Laursen, P. B., Williden, M., Chang, W. L., & Kilding, A. E. (2023). Carbohydrate intake before and during high intensity exercise with reduced muscle glycogen availability affects the speed of muscle reoxygenation and performance. *European Journal of Applied Physiology*, 123(6), 1479–1494.
<https://doi.org/10.1007/s00421-023-05162-y>

Roach, P. J., DePaoli-Roach, A. A., Hurley, T. D., & Tagliabracchi, V. S. (2012). Glycogen and its metabolism: some new developments and old themes. *Biochemical Journal*, 441(3), 763–787. <https://doi.org/10.1042/BJ20111416>

Röder, P. V., Geillinger, K. E., Zietek, T. S., Thorens, B., Koepsell, H., & Daniel, H. (2014). The role of SGLT1 and GLUT2 in intestinal glucose transport and sensing. *PLOS ONE*, 9(2), e89977. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089977>

Rollo, I., Williams, C., & Nevill, M. (2011). Influence of ingesting versus mouth rinsing a carbohydrate solution during a 1-h run. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(3), 468–475. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181f1cda3>

Romijn, J. A., Coyle, E. F., Sidossis, L. S., Gastaldelli, A., Horowitz, J. F., Endert, E., & Wolfe, R. R. (1993). Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 265(3), E380–E391. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1993.265.3.E380>

Rowlands, D. S., Houltham, S., Musa-Veloso, K., Brown, F., Paulionis, L., & Bailey, D. (2015). Fructose–glucose composite carbohydrates and endurance performance: Critical review and future perspectives. *Sports Medicine*, 45(11), 1561–1576. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0381-0>

Schweitzer, G. G., Smith, J. D., & Lecheminant, J. D. (2009). Timing carbohydrate beverage intake during prolonged moderate intensity exercise does not affect cycling performance. *International Journal of Exercise Science*, 2(1), 4–18. <https://doi.org/10.70252/QDMJ2907>

Saltiel, A. R., & Kahn, C. R. (2001). Insulin signalling and the regulation of glucose and lipid metabolism. *Nature*, 414(6865), 799–806. <https://doi.org/10.1038/414799a>

Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and metasyntheses. *Annual Review of Psychology*, 70, 747–770. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>

Spriet, L. L. (2014). New insights into the interaction of carbohydrate and fat metabolism during exercise. *Sports Medicine*, 44(Suppl. 1), S87–S96. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0154-1>

Stellingwerff, T., Morton, J. P., & Burke, L. M. (2019). A framework for periodized nutrition for athletics. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 29(2), 141–151. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0305>

Stephens, F. B., Roig, M., Armstrong, G., & Greenhaff, P. L. (2008). Post-exercise ingestion of a unique, high molecular weight glucose polymer solution improves performance during a subsequent bout of cycling exercise. *Journal of Sports Sciences*, 26(2), 149–154. <https://doi.org/10.1080/02640410701361548>

Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2016). Nutrition and athletic performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(3), 543–568. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000852>

van Loon, L. J. C., Greenhaff, P. L., Constantin-Teodosiu, D., Saris, W. H. M., & Wagenmakers, A. J. M. (2001). The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *The Journal of Physiology*, 536(1), 295–304. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.00295.x>

Viribay, A., Arribalzaga, S., Mielgo-Ayuso, J., Castañeda-Babarro, A., Seco-Calvo, J., & Urdampilleta, A. (2020). Effects of 120 g/h of carbohydrates intake during a mountain marathon on exercise-induced muscle damage in elite runners. *Nutrients*, 12(5), Article 1367. <https://doi.org/10.3390/nu12051367>

Zeeman, S. C., Kossmann, J., & Smith, A. M. (2010). Starch: Its metabolism, evolution, and biotechnological modification in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 209–234. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112301>

11. Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Prisma Flow</i>	47
---------------------------------	----

12. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Beurteilung PEDro-Skala</i>	50
<i>Tabelle 2: Ergebnisse</i>	54

13. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ATP	Adenosintriphosphat
CK	Kreatinkinase
CHO	Kohlenhydrate (Carbohydrates)
CON	Konstantes Zufuhrmuster (Constant)
DEC	Abnehmendes Zufuhrmuster (Decreasing)
EXP	Experimentalgruppe
F:M / Fru:Mal	Fruktose : Maltodextrin
G	Glukose
G+F	Glukose + Fruktose
GLU+MAL	Glukose + Maltodextrin
GI	Gastrointestinal
GLUT	Glukosetransporter
GLUT2	Glukosetransporter Typ 2
GLUT4	Glukosetransporter Typ 4
GLUT5	Fruktosetransporter
GOT	Glutamat-Oxalacetat-Transaminase
HIIT	High-Intensity Interval Training
HMW	Hochmolekulares Glukosepolymer (High Molecular Weight)
LMW	Niedermolekulares Glukosepolymer (Low Molecular Weight)
INC	Zunehmendes Zufuhrmuster (Increasing)
kJ	Kilojoule
LDH	Laktatdehydrogenase
LT	Laktatschwelle
PEDro	Physiotherapy Evidence Database
PICO	Population, Intervention, Comparison, Outcome

PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RCT	Randomisierte kontrollierte Studie
SGLT1	Sodium-Glucose Linked Transporter 1
SS	Steady State
TTE	Time to Exhaustion (Zeit bis zur Erschöpfung)
TT	Time Trial
VO ₂ max	Maximale Sauerstoffaufnahme
VO ₂ peak	Maximale Sauerstoffaufnahme (Peak-Wert)
Wmax	Maximale Leistung