

## Proteinversorgung im Ausdauersport

### Zusammenfassung

*Die Erholung von und Versorgung vor Ausdauerbelastungen ist sehr komplex und beinhaltet die Wiederauffüllung von Energieträgern, Rehydrierung und die Reparatur von Gewebestrukturen. Hierbei spielt die zielgerichtete Ernährung während der Erholungsphase eine wichtige Rolle. Deshalb ist es wichtig sowohl im Breiten- als Leistungssport die Ernährung entsprechend zu adaptieren.*

*Zwar spielt die Kohlenhydratversorgung während Ausdauerbelastungen die größte leistungslimitierende Rolle, aber im Fall einer Glykogen-Verarmung werden zunehmend auch Aminosäuren (insbesondere auch die verzweigtkettigen Aminosäuren) aus Strukturproteinen mobilisiert und der Oxidation bzw. der Glukoneogenese der Leber zugeführt. In solchen Fällen führt dies zu einem katabolen Zustand. Aufgrund der hemmenden Wirkung des hohen Energieverbrauches in der Muskulatur während der Ausdauerbelastung wird zudem die muskuläre Proteinbiosynthese unterdrückt. Dies ist bedingt durch die hemmende Wirkung des AMPK-Signalweges auf den mTOR-Signalweg. Letzterer stimuliert normalerweise die muskuläre Proteinsynthese in Folge eines Krafttrainingsreizes.*

*Betrachtet man die aktuelle Forschungslandschaft, lässt sich aus zeitlicher Sicht die Proteinversorgung in drei Abschnitte untergliedern. Studien zur expliziten Supplementierung vor der Ausdauerbelastung sind rar. Dennoch hat die International Society of Sport Nutrition Handlungsanweisungen publiziert. So sollen 3-4 Stunden vor langen Ausdauerbelastungen 1-2 g Kohlenhydrate (CHO) pro Kilogramm Körpergewicht kombiniert mit 0,15-0,25 g Proteinen/kg zugeführt werden. Bezüglich der Proteinversorgung während der Ausdauerbelastung sind die Ergebnisse uneinheitlich. Einige Studien zeigen im Time Trial to Exhaustion eine Leistungssteigerung bei kombinierten Gaben aus Proteinen und Kohlenhydraten. Aber einige Studien weisen methodische Mängel bzgl. der Test- und Präparatewahl auf und sind somit mit Vorsicht zu interpretieren. Zudem muss eine Supplementierung mit Proteinen/Aminosäuren während der Belastung – ähnlich wie die Zufuhr von Fruktose – auf die individuelle Verträglichkeit hin getestet werden. Eindeutige Ergebnisse finden sich bzgl. der Supplementierung in der Nachbelastungsphase. Hier zeigt die Gabe von Proteinen zusammen mit Kohlenhydraten (0,25-0,3 g/kg/h Protein + 1,2-1,6 g/kg/h CHO) in den ersten Stunden der Nachbelastungsphase eine schnellere Glykogenresynthese und eine Erhöhung der muskulären Proteinsynthese, was zusammen zu einer Beschleunigung der Regeneration führt.*

*Darüber hinaus zeigen neuere Untersuchungsmethoden zur Quantifizierung der Proteinoxidation, dass die aktuellen Empfehlungen der Grundproteinversorgung im Ausdauersport mit 1,2-1,4 g/kg pro Tag wohl zu niedrig angesetzt sind. Evidenzbasierte Empfehlungen deuten eher auf eine Spanne von 0,94-2,0 g/kg Protein pro Tag für*

*eine ausgeglichene und 1,14-2,6g für eine positive Proteinbilanz hin. Zudem spielt die Verfügbarkeit der verzweigt-kettigen Aminosäuren insbesondere in der Nachbelastungsphase eine herausragende Bedeutung. Zudem ist auch der Proteinqualität (Aufbereitung und Verarbeitung) und die Proteinherkunft (tierisch oder pflanzlich) eine entscheidende Rolle in der Versorgung zuzuordnen und muss auf individuelle Vorlieben und Verträglichkeit abgestimmt werden.*

## **1 Wissenschaftlicher Hintergrund**

Eine ausgewogene und bedarfsdeckende Ernährung hat im Sport eine essenzielle Bedeutung für die Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Durch ausgewählte Ernährungsstrategien können sportliche Leistungen sowie die Erholung von körperlichen Belastungen wesentlich verbessert werden. In Abhängigkeit von Art, Umfang und Intensität des Trainings ergeben sich unterschiedliche nutritive Anforderungen (Rodriguez, Di Marco & Langley, 2009). Wettkampfbelastungen und intensive körperliche Aktivität führen zu differenzierteren Anforderungen an die Nahrungsaufnahme von Athleten verglichen mit der Normalbevölkerung (Magkos & Yannakoulia, 2003). Insbesondere der Makronährstoff Protein nimmt durch seine lebenswichtigen und vielseitigen Funktionen einen hohen Stellenwert in der Sportwelt ein. Die Bedeutung der Proteinzufuhr im Ausdauersport wird jedoch sehr kontrovers diskutiert (Jeukendrup & Gleeson, 2019).

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Meinungen der Wissenschaftler. Der eine Teil ist davon überzeugt, dass durch regelmäßiges Training und Sport der nutritive Bedarf an Protein erhöht wird. Der andere Teil der Forscher hingegen denkt, dass sich der Proteinbedarf nicht von der inaktiven Bevölkerung unterscheidet (Jeukendrup & Gleeson, 2019).

Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) empfiehlt für Erwachsene ab 19 bis unter 65 Jahren eine tägliche Proteinzufuhr von 0,8 g/kg Körpergewicht. Für Sportler gibt es laut DGE keine gesonderte Empfehlung für die Proteinzufuhr. Auf der Website der DGE heißt es: „Zur Sicherstellung einer ausreichenden Proteinzufuhr bei erwachsenen Breitensportlern (4-5 Mal je Woche 30 Minuten körperliche Aktivität bei mittlerer Intensität) ist eine Proteinzufuhr in Höhe der empfohlenen Zufuhr von 0,8 g/kg Körpergewicht pro Tag ausreichend. Leistungssportler benötigen je nach Sportart und Trainings- oder Wettkampfphase individuelle Beratung und Betreuung (Deutsche Gesellschaft für Ernährung, 2017).“ Das Institute of Medicine in den USA empfiehlt ebenfalls eine tägliche Proteinzufuhr von 0,8 g/kg Körpergewicht. Mit dieser Proteinmenge sollten die nutritiven Bedürfnisse von nahezu allen (97-98 Prozent) gesunden Männern und Frauen im Alter von 19 Jahren und älter gedeckt sein (Institute of Medicine of the National Academies, 2002). Das American College of Sports Medicine, die American Dietetic Association und die Dietitians of Canada gaben 2009 eine Empfehlung von 1,2-1,4 g Protein/kg Körpergewicht/Tag für Ausdauerathleten bekannt (Rodriguez et al., 2009).

Eine Erklärung für den erhöhten Proteinbedarf im Ausdauersport verglichen mit der Normalbevölkerung ist die erhöhte Oxidation von Aminosäuren während körperlicher Aktivität. Intensives Ausdauertraining steigert die Oxidation der verzweigt-kettigen Aminosäuren Leucin, Isoleucin und Valin. Es handelt sich hierbei um essenzielle Aminosäuren, die der Körper nicht selbst herstellen kann. Infolgedessen kommt es zu einem erhöhten Abbau von Proteinen, was zur Steigerung des Proteinbedarfs führt (Tarnopolsky, 2004). Viele Studien nutzten hierbei die klassische Stickstoffbilanz-Methode, um den erhöhten Proteinbedarf von Ausdauersportlern gegenüber Nichtsportlern darzustellen (Houltham & Rowlands, 2014; Rowlands & Wadsworth, 2011; Tarnopolsky, MacDougall & Atkinson, 1988). Neben der klassischen Methode kommen heutzutage auch massenspektrometrische Methoden zum Einsatz, die über eine isotoopen-markierte Indikator-Aminosäure den Proteinverbrauch bestimmt (Kato, Suzuki, Bannai & Moore, 2016).

### *1.1 Was sind Proteine*

Proteine sind wichtige Moleküle im menschlichen Körper, die regulatorische und strukturelle Funktionen erfüllen. Proteine wirken als Enzyme, Hormone und Antikörper bei der Infektabwehr. In der Muskulatur, im Bindegewebe sowie in Haut und Haaren kommen sie als Körperstrukturen vor (Rehner & Daniel, 1999). Bausteine der Proteine sind die Aminosäuren, welche eine Amino- (-NH<sub>2</sub>), eine Carboxy- (-COOH) sowie eine Restgruppe enthalten. Die meisten Proteine sind Polypeptide, die Kombinationen von bis zu 300 Aminosäuren aufweisen (Jeukendrup & Gleeson, 2019). Insgesamt gibt es 20 proteinogene Aminosäuren, davon sind 11 nicht bzw. bedingt essentiell und 9 dieser Aminosäuren gelten als unverzichtbar. Hierzu zählen: Histidin, Isoleucin, Leucin, Lysin, Methionin, Phenylalanin, Threonin, Tryptophan und Valin (Smith & Rennie, 1996). Die essentiellen Aminosäuren müssen durch die Nahrung aufgenommen werden, da sie nicht vom Körper produziert werden können (Jager et al., 2017).

### *1.2 Tierische Proteinquellen*

Die Qualität eines Proteins ist abhängig von dessen Bioverfügbarkeit, von der Verdaulichkeit und von dem Gehalt an essentiellen Aminosäuren (Hoffman & Falvo, 2004). Letztlich lässt sich die Proteinqualität definieren als die Effektivität, die Muskelproteinsynthese zu stimulieren sowie die Muskelhypertrophie zu fördern (Jager et al., 2017). Es gibt verschiedene Methoden, die Qualität eines Proteins zu bewerten wie beispielsweise die biologische Wertigkeit oder der Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score (Hoffman & Falvo, 2004). Die höchstmögliche Einstufung des PDCAAS (Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score) liegt bei 1,0, die niedrigste Klassifizierung hingegen bei 0,0 (Jeukendrup & Gleeson, 2019).

Typischerweise werden alle tierischen Proteinquellen als vollständige Proteine betrachtet, weil sie alle essentiellen Aminosäuren enthalten. Proteine tierischen Ur-

sprungs sind trotz ihrer Vollständigkeit an essentiellen Aminosäuren oft mit einer hohen Aufnahme an gesättigten Fettsäuren und Cholesterin assoziiert. Beispiele für tierische Proteine sind Milch-, Ei- und Fleischproteine (Hoffman & Falvo, 2004).

Molke ist das wässrige Nebenerzeugnis der Milch bei der Käseproduktion. Aus dieser Flüssigkeit werden mithilfe verschiedener Verfahren die Molkenproteine gewonnen. Die Molke ist neben Kasein das Hauptprotein der Kuhmilch. Das Molkeneiweiß liefert eine hohe Menge an essentiellen und verzweigtkettigen Aminosäuren. Zusätzlich ist es reich an Mineralien sowie Vitaminen und findet aufgrund seiner Eigenschaften oft Anwendung in der Sporternährung. Kasein ist verantwortlich für die charakteristische Farbe der Milch und ist mit 70-80% das Hauptprotein der Kuhmilch. Ähnlich wie das Molkenprotein ist Kasein ein vollständiges Protein mit vielen Nährstoffen und Vitaminen. In der Milch kommt es in Form einer Mizelle vor und besitzt die Fähigkeit, die Aminosäuren langsam in den Blutkreislauf abzugeben. Während beide Milchproteine von hoher Qualität sind, unterscheidet sie jedoch die Verdauungsgeschwindigkeit (Hoffman & Falvo, 2004). Das Molkenprotein ist wasserlöslich und somit sehr schnell verdaubar, wohingegen das Kasein wasserunlöslich ist, im Darm gerinnt und deshalb wesentlich langsamer abgebaut wird (Boirie et al., 1997). Das Kasein bietet somit eine bessere Speicherung und Nutzung des Stickstoffs im Körper (Hoffman & Falvo, 2004).

Eiproteine haben eine gute Verdaulichkeit und weisen einen hohen Anteil an essentiellen Aminosäuren auf. Aufgrund dieser Beschaffenheit sind sie eine sehr gute Proteinquelle für Sportler (Jager et al., 2017). Kritisiert wird häufig der Cholesteringehalt von Eiern, die aktuelle Evidenz zeigt jedoch einen fehlenden Zusammenhang zwischen dem Verzehr von Eiern und einer koronaren Herzerkrankung (Hu et al., 1999). Ein großes Ei enthält 6 g Eiweiß, 75 kcal und nur 1,5 g gesättigte Fettsäuren. Außerdem ist es eine kostengünstige, qualitative Proteinquelle mit einem hohen Leucin-Gehalt (Hasler, 2000; Jager et al., 2017).

Fleisch ist bekanntlich eine Quelle für essentielle Aminosäuren. Besonders Rindfleisch ist bekannt für seine hohe biologische Wertigkeit, da die enthaltenen Aminosäuren in ähnlicher Form in der menschlichen Muskulatur vorkommen. Dabei enthalten 113,4 g fettarmes Rindfleisch insgesamt 29,5 g Aminosäuren (Symons et al., 2007). Neben dem hohen Gehalt an Aminosäuren kann Fleisch auch als wichtiger Lieferant für Mikronährstoffe wie beispielsweise Vitamin A, Eisen oder Folsäure dienen (Jager et al., 2017).

### *1.3 Pflanzliche Proteinquellen*

Pflanzlichen Proteinen hingegen fehlt es generell an ein oder zwei essentiellen Aminosäuren und sie werden deshalb als unvollständig bezeichnet. Getreide mangelt es an Lysin und Hülsenfrüchten fehlt die essenzielle Aminosäure Methionin (Jeukenrup & Gleeson, 2019). Mit einer ausgewogenen Ernährung und kombinierten Zufuhr basierend auf verschiedenen Gemüsesorten, Früchten, Hülsenfrüchten, Soja und Getreide, kann für Menschen, die auf tierisches Protein verzichten möchten (z.B.

Vegetarier), trotzdem eine ausreichende Versorgung mit allen essentiellen Aminosäuren gewährleistet werden. Pflanzliche Proteine sind durch ihre fett- und cholesterinarme Zusammensetzung und den Gehalt an vielen Nährstoffen wie sekundäre Pflanzenstoffe und Ballaststoffe eine besonders wertvolle Proteinquelle (Hoffman & Falvo, 2004).

Soja ist die am häufigsten verwendete pflanzliche Proteinquelle. Mit einem Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score von 1,0 erreicht die Sojabohne die höchstmögliche Einstufung und ist somit gleichwertig mit tierischem Protein (Hasler, 2002). Soja ist ebenso ein vollständiges Protein mit einer hohen Konzentration an verzweigt-kettigen Aminosäuren. Aufgrund dieser Eigenschaften ist es besonders für Vegetarier ein hochwertiger Fleischersatz und für Menschen mit Laktoseintoleranz eine sehr gute Eiweißquelle (Hoffman & Falvo, 2004). Soja ist seit Jahrhunderten Teil der menschlichen Ernährung. Besonders Frauen profitieren von einer hohen Soja-Aufnahme, da diese mit einem geringen Brustkrebsrisiko assoziiert wird. Zusätzlich zeigten sich positive Effekte auf das Osteoporoserisiko sowie menopausale Beschwerden (Ho et al., 2003; Murkies et al., 1995; Wu et al., 1998).

#### 1.4 *Stickstoffbilanzmessung der Proteinbedarfsbestimmung*

Die Stickstoffbilanzmessung ist eine klassische Methode zur Bestimmung des Proteinbedarfs beim Menschen. Dieses Verfahren beinhaltet die Messung der gesamten Stickstoffausscheidung und der gesamten Stickstoffaufnahme. Die Differenz der beiden Größen ergibt die Stickstoffbilanz. Stickstoff wird ausgeschieden durch Urin, Stuhl, Schweiß und Sonstiges wie beispielsweise Haare, Haut, Samenflüssigkeit und Verluste bedingt durch die Menstruation (Rand, Pellett & Young, 2003; Young, Bier & Pellett, 1989). Bei der Bestimmung erhalten die Testpersonen in der Regel eine Diät mit einer gewissen Menge an Protein, um die Zufuhrmengen verlässlich bestimmen zu können. Die Ausscheidungen werden meistens in Form einer 24-Stunden-Sammlung des produzierten Urins sowie Stuhls abgeschätzt. Die spezielle Ernährungsweise sollte für mindestens eine Woche bestehen, dass sich die Anpassung im Urin widerspiegelt (Jeukendrup & Gleeson, 2019). Eine negative Stickstoffbilanz liegt vor, sobald eine Person mehr Protein verliert, als sie aufnimmt. Überschreitet die aufgenommene Stickstoffmenge die abgegebene Menge, zeigt sich eine positive Stickstoffbilanz. Die geschätzte sichere Proteinaufnahme für einen bestimmten physiologischen Zustand (z.B. Schwangerschaft oder Stillzeit) wird bestimmt durch die Zufuhr verschiedener Proteinmengen und die jeweilige Bestimmung der Stickstoffbilanz. Eine Regressionsanalyse kann anhand der gewonnenen Daten erstellt werden, um den Proteinbedarf für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz zu schätzen. Durch diese Vorgehensweise kann eine sichere Proteinzufuhr für 97 % der Bevölkerung gewährleistet werden (Rand et al., 2003; Young et al., 1989).

Trotz der häufigen Verwendung dieser Methode ist sie nicht einfach anzuwenden und weist zahlreiche Schwächen auf. Das Verfahren ist sehr zeit- und arbeitsaufwendig, da es mehrere (häufig 5-7) 24-stündige Urinentnahmen erfordert. Zudem ist die erfolgreiche Durchführung der Messung stark von der Compliance der Testperson

abhängig (Jeukendrup & Gleeson, 2019). Eine weitere Limitation ist die allgemeine Prädisposition, die Proteinaufnahme zu überschätzen und den Proteinverlust zu unterschätzen (Forbes, 1973), was die Unterschätzung des Proteinbedarfs zur Folge hat (Humayun, Elango, Ball & Pencharz, 2007). Der Stickstoffverlust wird oft unterschätzt, da meistens ausschließlich eine Messung des im Urin enthaltenen Stickstoffs vorgenommen wird und die zusätzlichen Verluste nur durch Schätzungen erhoben werden. Der Ausscheidungsweg des Stickstoffs erfolgt überwiegend, zu 90 Prozent, in Form von Harnstoff, aber auch durch Ammoniak, Kreatinin, Harnsäure und andere stickstoffhaltige Verbindungen (Jeukendrup & Gleeson, 2019).

Dennoch können bei korrekter Durchführung und angemessener Betrachtung der Schwächen wichtige Erkenntnisse aus Stickstoffbilanzstudien entnommen werden (Jeukendrup & Gleeson, 2019).

### *1.5 Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode*

In den letzten zehn Jahren wurde eine neue minimal invasive Methode zur Bestimmung des Proteinbedarfs unter Einsatz stabiler Isotope (z.B.  $^{13}\text{C}$ -Phenylalanin) erarbeitet, die sogenannte Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode (IAAO). Dieses Verfahren wurde als Alternative zur traditionellen Stickstoffbilanzmethode entwickelt. Die IAAO basiert auf dem folgenden Konzept: Wenn eine essentielle Aminosäure für die Proteinsynthese nicht zur Verfügung steht, wird der Überschuss aller anderen essentiellen Aminosäuren, einschließlich der Indikatoraminosäure, oxidiert. Bei dieser Methode wird  $^{13}\text{C}$ -Phenylalanin als Indikatoraminosäure verwendet, um den Ganzkörper-Phenylalanin-Fluss, die  $^{13}\text{CO}_2$ -Ausscheidung und die Phenylalanin-Oxidation zu bestimmen. Mit einer erhöhten Aufnahme der fehlenden Aminosäure nimmt die Oxidation der Indikator-Aminosäure ab und spiegelt hiermit die verstärkte Aufnahme in das Protein wider. Sobald der Bedarf an der limitierten Aminosäure gedeckt ist, stabilisiert sich auch die Oxidation der Indikator-Aminosäure. Die Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode findet ihre Anwendung hauptsächlich bei der Bestimmung des Bedarfs an essentiellen Aminosäuren bei Erwachsenen, der metabolischen Verfügbarkeit von Aminosäuren in Nahrungsproteinen und bei der Untersuchung des gesamten Proteinbedarfs (Elango, Ball & Pencharz, 2012; Kato et al., 2016).

Gegenüber dem Goldstandard weist die IAAO-Methode einige Vorteile auf. Die kurze Anpassungsperiode (ca. 1 Tag) an die proteinreiche Ernährungsweise, verglichen mit der Stickstoffbilanzmethode (5-7 Tage), ermöglicht mehrere Testproteineinnahmen der einzelnen Probanden. Zudem kann der Proteinbedarf durch die nicht-invasive Vorgehensweise auch bei Neugeborenen, Kindern und Erkrankten bestimmt werden. Zusammenfassend ist die IAAO-Methode ein solides, verlässliches und schnelles Verfahren für die Ermittlung des Proteinbedarfs in verschiedenen Populationen im Verlauf des Lebenszyklus und in Krankheit (Elango et al., 2012; Kato et al., 2016).

## 1.6 Was ist der Proteinbedarf im Ausdauersport?

Der tägliche Proteinbedarf ist davon abhängig wie viele Aminosäuren unser Körper benötigt, um die Zellmasse und Gewebe zu erhalten (Phillips, 2004; Weineck & Weineck, 2010). Dafür werden permanent Proteine auf- und abgebaut. Die Balance zwischen Abbau (Katabolismus) und Aufbau (Anabolismus) wird als Protein-Turnover bezeichnet (Lunn et al., 2012). Das heißt, wenn mehr Protein aufgebaut werden soll, benötigen wir eine positive Nettobilanz im Turnover. Da aber eine Gewichtszunahme im Ausdauersport nicht immer erstrebenswert ist, ist hier das Ziel eine ausgeglichene Bilanz und zudem auch eine Verbesserung der Energieversorgung und Erholung zu erreichen, da durch intensive Belastungen nicht nur Fett und Kohlenhydrate zur Energieversorgung herangezogen werden (Beelen et al., 2011; Breen et al., 2011). Aus diesem Grund ist es sinnvoll im Ausdauersport auch die Proteinversorgung zu sichern um mögliche Leistungsdefizite zu reduzieren (Beck, Thomson, Swift & von Hurst, 2015).

Somit wollen wir mit dieser Übersichtsarbeit anhand der aktuellen Studienlage aufzeigen, wann und in welchem Umfang eine Proteinsupplementierung bzw. Ernährungsadaptation im Ausdauersport sinnvoll ist.

Durch zwei getrennte systematischen Literaturanalysen konnten wir 14 Studien bezüglich des grundsätzlichen Proteinbedarfs (Abbildung 1) und 29 zur getimten Proteinversorgung (Abbildung 2) einschließen.

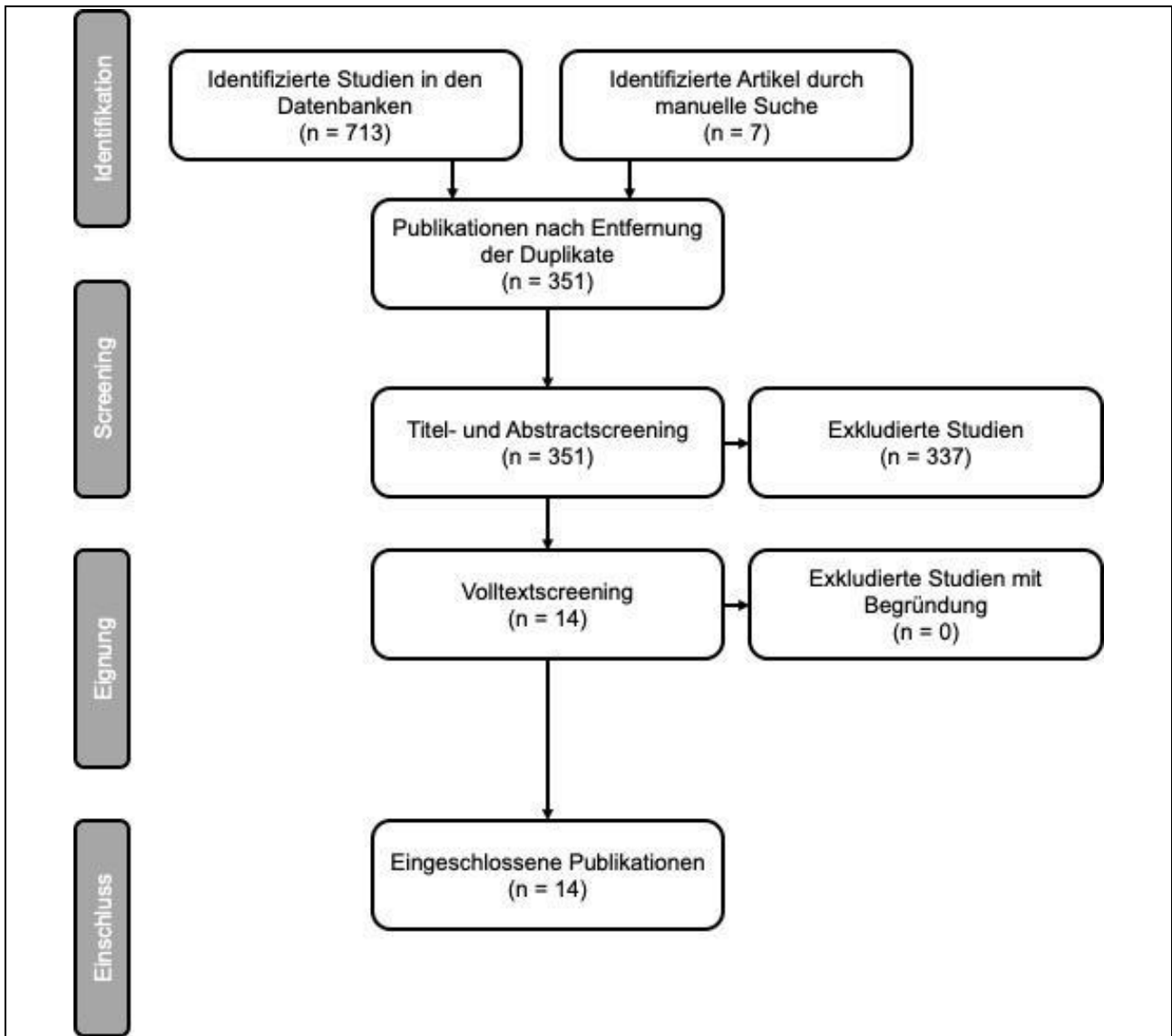


Abb. 1. Systematische Literatursuche (Moher, Liberati, Tetzlaff, Altman, & Group, 2009) zur Proteinversorgung im Ausdauersport (Knödseder, 2019)



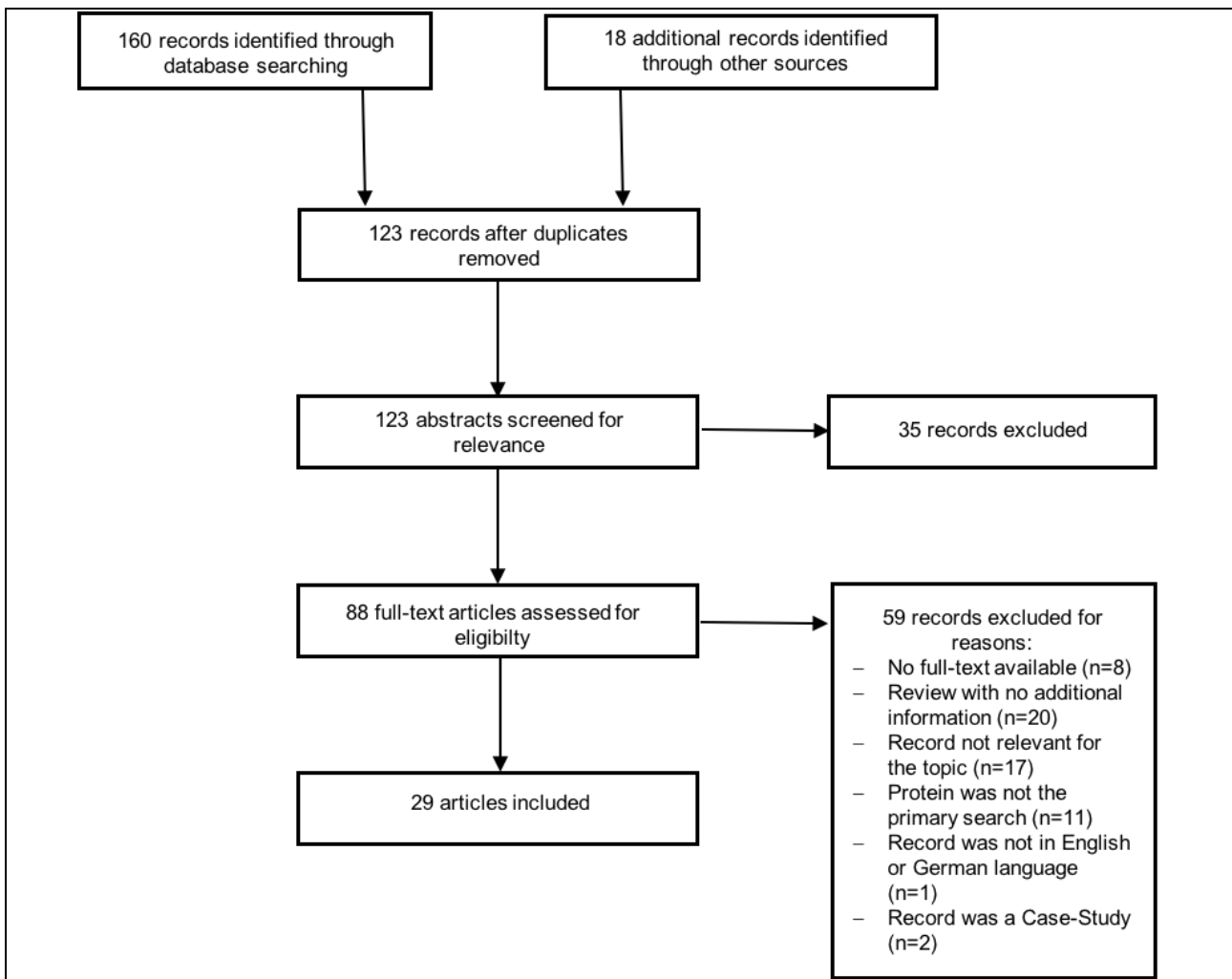


Abb. 2. Systematische Literaturanalyse (Moher et al., 2009) zum Timing der Proteinversorgung im Ausdauersport (Wolf, 2019).

## 2 Proteinempfehlungen im Ausdauersport

Durch die Literatursuche bis einschließlich Mai 2019 wurden 713 Publikationen identifiziert, 7 weitere Studien wurden durch die manuelle Suche in den Referenzlisten gewonnen. Nach dem Ausschluss von 362 Duplikaten wurde bei den restlichen 351 Publikationen ein Titel- und Abstractscreening durchgeführt. 337 Studien wurden daraufhin exkludiert. Die Ausschlussgründe waren zum einen das Nichterfüllen der Einschlusskriterien sowie zum anderen der fehlende Zusammenhang mit dem untersuchten Thema. Die verbleibenden 14 Artikel wurden einem Volltextscreening unterzogen und daraufhin in die vorliegende Arbeit eingeschlossen. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 1.

Tab. 1. Übersicht zu Proteinempfehlungen im Ausdauersport

Studie	Jahr	n	Geschlecht	Sportart	Studienprotokoll	Methode	Ergebnis
Williams et al.	2019	10	m	Laufen	3 Untersuchungen mit jeweils 4 Tagen kontrolliertem Training (20, 5 10, 20 km/Tag) und einer Diät mit 0.94, 1.20 bzw. 1.83 g Protein/kg Körpergewicht pro Tag	Stickstoffbilanz	• RDA: $\geq 1.8$ g
Bandegan et al.	2019	8	m	Sonstige Ausdauersportarten: Triathlon, Duathlon, Laufen	An Tag 1 und 2, Diät mit 1.6 g Protein/kg Körpergewicht pro Tag und Training. 24 h nach dem Training mehrfache Zufuhr von Protein im Bereich von 0.3-3.5 g/kg Körpergewicht/Tag	IAAO	• EAR: 2.1 g • RDA: 2.6 g
Matsuda et al.	2018	13	m	Schwimmen	5-tägige Untersuchungsperiode mit Beibehaltung der gewöhnlichen Trainingsausführung und Ernährungsweise. An Tag 4, Messung von Stickstoffzufuhr und Stickstoffausscheidung	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.43 g • RDA: 1.92 g
Kato et al.	2016	6	m	Laufen	3-tägige Trainingsperiode mit kontrollierter Diät (1.4 g Protein/kg Körpergewicht pro Tag) und Training (10 km an Tag 1 und 5 km an Tag 2). Am 3. Tag 20 km-Lauf und mehrfache Zufuhr von Protein im Bereich von 0.2-2.8 g/kg Körpergewicht/Tag	IAAO	• EAR: 1.65 g • RDA: 1.83 g
Houltham et al.	2014	10	w	Sonstige Ausdauersportarten: Radfahren, Triathlon	72-stündige Stickstoffbilanzmessung nach Zufuhr einer normalen (1.4 g/kg Körpergewicht pro Tag) und hohen (2.7 g/kg Körpergewicht pro Tag) Proteinmenge	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.63 g
Rowlands et al.	2011	12	w	Radfahren	2 Untersuchungen mit einer jeweiligen Dauer von 4 Tagen. An Tag 1, 2 und 4 kontrolliertes Training und an Tag 3 Ruhetag. Zusätzlich an Tag 1 und 2 Erholungsdiät mit einer hohen Proteinzufuhr oder isokalorischer Kontrollzufuhr	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.28 g
Gaine et al.	2006	5	m	Laufen	3-wöchige Intervention mit einer niedriger (0.8 g/kg Körpergewicht pro Tag), moderaten (1.8 g/kg Körpergewicht pro Tag) und hohen (3.6 g/kg Körpergewicht pro Tag) Proteinzufuhr. Das Training wurde in diesem Zeitraum wie gewöhnlich gestaltet. Nach der Intervention 24 h Stickstoffbilanzmessung	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.2 g
Forslund et al.	1999	14	m	Radfahren	7-tägige Untersuchungsperiode mit standardisierter Diät und hohen (2.5 g/kg Körpergewicht pro Tag) bzw. normalen (1.0 g/kg Körpergewicht pro Tag) Proteineinnahmen. Zusätzlich zweimal täglich kontrolliertes moderates Training mit einer Dauer von 90 min bei 45-50% der maximalen Sauerstoffaufnahme	Stickstoffbilanz	• EAR: $> 1.0$ g
El Kourhy et al.	1997	8	m	Radfahren	7-tägige Untersuchungsperiode mit einer standardisierten Diät und einer Proteinzufuhr von 1.0 g/kg Körpergewicht pro Tag. Zusätzlich zweimal täglich kontrolliertes moderates Training mit einer Dauer von 90 min bei 45-50% der maximalen Sauerstoffaufnahme	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.0 g
Phillips et al.	1993	12	m, w	Laufen	10-tägige Anpassungsperiode an eine Diät mit Proteinzufuhren gemäß „Canadian RNI“ von ungefähr 0.86 g/kg Körpergewicht pro Tag und 3-tägige Stickstoffbilanzmessung. Zusätzlich Beibehaltung der gewöhnlichen Trainingsumfänge	Stickstoffbilanz	• EAR: $> 0.86$ g
Meredith et al.	1989	12	m	Sonstige Ausdauersportarten: Radfahren, Laufen, Rudern, Gymnastik	3 separate 10-tägige Untersuchungen bei Aufrechterhaltung der gewöhnlichen Trainingseinheiten und einer Diät mit Proteineinnahmen von 0.6, 0.9 oder 1.2 g/kg Körpergewicht pro Tag	Stickstoffbilanz	• EAR: 0.94 g • RDA: 1.26 g
Friedman et al.	1989	5	m	Laufen	2 getrennte 6-tägige Untersuchungsperioden mit einer Proteinaufnahme von 0.86 bzw. 1.49 g/kg Körpergewicht pro Tag und regulärem Trainingsprogramm (12-16 km/Tag)	Stickstoffbilanz	• EAR: $> 0.8$ g • RDA: 1.14-1.39 g
Brouns et al.	1989	13	m	Radfahren	7 Tage lange, anstrengende Fahrradfahrt und Vergleich zweier unterschiedlicher Diäten. Zusätzlich Messung der Stickstoffbilanz und Proteinoxidation	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.5-1.8 g
Tamopolsky et al.	1988	18	m	Sonstige Ausdauersportarten: Laufen, Langlaufen	2 10-tägige Perioden mit einer normalen Proteinzufuhr und einer geänderten Proteinzufuhr, gefolgt von einer 3-tägigen Stickstoffbilanzmessung. Zusätzliches Trainings gemäß gewöhnlicher Trainingsroutine	Stickstoffbilanz	• EAR: 1.37 g

## 2.1 Proteinbedarf von Läufern

Im folgenden Abschnitt möchten wir die wichtigsten Aspekte der einzelnen Studien herausarbeiten.

Friedman & Lemon (1989) ermittelten bei 5 männlichen Langstreckenläufern (24-29 Jahre,  $VO_2\max$   $71\pm 5$  ml  $O_2$ /kg/KG) den Bedarf an Nahrungsprotein. Die Läufer trainierten seit mehr als 5 Jahren mit Trainingsumfängen von  $94\pm 21$  km. An zwei gesonderten Zeitpunkten konsumierten die Langstreckenläufer eine fleischlose Diät über 6 Tage. Bei der ersten Untersuchung verzehrten die Studienteilnehmer die empfohlene Tagesdosis Protein von  $0,86\pm 0,23$  g/kg Körpergewicht. Die Proteinzufuhr bei der zweiten Untersuchung war 1,7mal höher und lag bei  $1,49\pm 0,29$  g/kg Körpergewicht/Tag. Unter beiden diätischen Behandlungen führten die Probanden den gleichen 6-tägigen experimentellen Ablauf durch. Hierbei bleibt die Stickstoffretention positiv bei der erhöhten Proteinzufuhr, aber war signifikant reduziert bei Einnahme der empfohlenen Proteindosis. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die empfohlene Tagesdosis an Protein für Ausdauerathleten, die hochintensive körperliche Belastung ausführen, möglicherweise inadäquat ist. Der hypothetische Proteinbedarf der Probanden müsste laut Friedman & Lemon (1989) bei 1,14-1,39 g Protein/kg Körpergewicht/Tag liegen und ist somit 42-74 Prozent höher als die aktuelle Proteinnempfehlung.

Aufgrund der unterschiedlichen Verteilung von Muskelmasse zwischen den Geschlechtern liegt es nahe, dass auch der Verbrauch zwischen Mann und Frau unterschiedlich ist. Aus diesem Grund verglichen Phillips et al. männliche und weibliche Athleten hinsichtlich der Stickstoffbilanz. Sie rekrutieren hierfür 6 weibliche ( $23,0\pm 4,9$  Jahre,  $VO_2\max$   $54,6\pm 4,4$  ml  $O_2$ /kg/KG) und 6 männliche Läufer ( $23,3\pm 3,9$  Jahre,  $VO_2\max$   $59,1\pm 63$  ml  $O_2$ /kg/KG). Die Frauen wiesen einen normalen Menstruationszyklus mit einer Länge von 27-33 Tagen auf und nahmen keine oralen Kontrazeptiva zu sich. Die Testungen wurden in der mittleren Follikelphase durchgeführt (Phillips, Atkinson, Tarnopolsky & MacDougall, 1993). Die Studie bestand aus zwei unterschiedlichen Phasen. In der Einführungsphase konsumierten die Studienteilnehmer eine Diät, die aus  $89\pm 4,5\%$  der gewöhnlichen subjektiven Energiezufuhr und bei den männlichen Läufern zusätzlich täglich  $0,94\pm 0,01$  Gramm Protein/kg/KG und für die Läuferinnen  $0,80\pm 0,01$  Gramm Protein/kg/KG bestand. Die Proteinzufuhr entsprach in etwa der kanadischen Empfehlung für die Nährstoffaufnahme (Canadian RNI). In der 10-tägigen Periode trainierten die Läufer gemäß ihren gewöhnlichen Trainingsplänen. Dieser Trainingsperiode schloss sich eine 3-tägige Stickstoffbilanzmessung an. Es konnte gezeigt werden, dass der gesamte Stickstoffverlust pro Tag bei den männlichen Probanden verglichen mit den weiblichen signifikant höher. Die Studie zeigte ferner, dass eine Aufnahme von  $0,86$  Gramm Protein/kg/KG pro Tag unzureichend für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz ist. Fünf von sechs weiblichen Athleten und alle männlichen Athleten befanden sich in einer negativen Stickstoffbilanz (Phillips et al., 1993).

Da sich ernährungsbedingte Auswirkungen oft erst nach einigen Wochen zeigen, haben Gaine et al. eine mehrwöchige Intervention durchgeführt. Hierzu rekrutierten sie fünf männliche Läufer ( $21,3 \pm 0,3$  Jahre,  $VO_2\max 70,6 \pm 0,1$  ml  $O_2$ /kg/KG) mit einem wöchentlichen Trainingsumfang von umgerechnet  $83,3 \pm 3,2$  km. Alle Probanden erhielten für drei Wochen drei unterschiedliche Diäten: proteinarm 0,8 Gramm Protein/kg/KG pro Tag, moderate 1,8 Gramm Protein/kg/KG pro Tag und proteinreich 3,6 g Protein/kg/KG pro Tag. Die Hauptproteinquelle wurde in Form von Rindfleisch und handelsüblichen Proteinriegeln verabreicht. Nach der diätetischen Intervention wurde der Urin über 24 Stunden gesammelt, um die Stickstoffbilanz zu ermitteln. Die Stickstoffbilanz war für die proteinreiche Diät ( $10,2 \pm 0,7$ ) signifikant höher im Vergleich zur moderaten ( $1,8 \pm 0,6$ ) und proteinarmen ( $-0,3 \pm 0,5$ ). Anhand dieser Ergebnisse berechneten die Autoren einen Proteinbedarf für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz von  $1,2$  g/kg/KG pro Tag (Gaine et al., 2006).

Da die klassische Stickstoffbilanzmethode ungenau ist, haben Kato et al. den Proteinbedarf von Ausdauerathleten mit Hilfe der Indikator-Aminosäure-Methode bestimmt. Hierzu wurden 6 männliche Läufer im Alter von  $28,3 \pm 4,2$  Jahren ( $VO_2\max 60,3 \pm 6,7$  ml  $O_2$ /kg/KG) eingeschlossen, die über einen Zeitraum von drei Tagen untersucht wurden.

Die 3-tägige Studie bestand aus einer 2-tägigen Anpassungsperiode, die einen 10-Kilometer-Lauf am ersten Tag und einen 5-Kilometer-Lauf am zweiten Tag umfasste. Am Untersuchungstag (3. Tag) absolvierten die Probanden einen 20-Kilometer-Lauf. Somit absolvierten die Studienteilnehmer in der experimentellen Phase insgesamt 35 Kilometer, was ihrem gewöhnlichen Trainingsumfang entsprach (Kato et al., 2016). In der Anpassungsperiode konsumierten die Läufer eine Diät mit einem Proteingehalt von  $1,4$  g/kg/KG pro Tag, entsprechend der aktuellen Proteinempfehlung für Ausdauersportler (Kato et al., 2016; Rodriguez et al., 2009). Nach nächtlichem Fasten (ca. 7 h) wurde am 3. Tag die Stoffwechseluntersuchung durchgeführt. Nach der Aufnahme eines proteinfreien Getränks wurde der 20-Kilometer-Lauf mit selbstgewählter Geschwindigkeit durchgeführt. Sofort nach dem Training erhielten die Probanden die Studiendiät mit zufällig zugeteilten Proteinzufuhren zwischen  $0,2$  und  $2,8$  g Protein/kg/KG pro Tag. Die Autoren errechneten hierbei einen durchschnittlichen Proteinbedarf von  $1,65$  g Protein/kg/KG pro Tag. Die empfohlene Tagesdosis wurde definiert als das obere 95 Prozent Konfidenzintervall und lag bei  $1,83$  g Protein/kg/KG pro Tag (Kato et al., 2016).

Eine aktuelle Studie von Williamson et al. aus dem Jahr 2019 hat sich ebenfalls mit dem Proteinbedarf von Läufern beschäftigt. Hierzu wurden 10 gesunde männliche Ausdauersportler ( $32 \pm 8$  Jahre,  $VO_2\max 64,7 \pm 7,9$  ml  $O_2$ /kg/KG) mit einem durchschnittlichen Wochentrainingsumfang von  $62 \pm 30$  km rekrutiert (Williamson, Kato, Volterman, Suzuki & Moore, 2019).

Während einer 4-tägigen Trainingsperiode absolvierten die Probanden ein typisches Laufprogramm mit 20, 5, 10 und 20 km/Tag. Während der Trainingsperiode erhielten

die Läufer unterschiedliche Proteinmengen (niedrig: 0,94 g Protein/kg/KG pro Tag; moderat: 1,20 g Protein/kg/KG pro Tag; hoch: 1,83 g Protein/kg/KG pro Tag) (Williamson et al., 2019), welche auf unterschiedlichen Empfehlungen aus der Literatur basierten. Die Ernährungsweise mit dem niedrigen Proteingehalt repräsentiert den durchschnittlichen Proteinbedarf von Ausdauerathleten bestimmt durch die Stickstoffbilanzmethode nach Meredith et al. (Meredith, Zackin, Frontera & Evans, 1989). Hingegen entspricht die hohe Tagesdosis an Protein den Empfehlungen, die mit Hilfe der Indikator-Aminosäure-Methode erhoben wurden (Humayun et al., 2007). Die moderate Proteinzufuhr stellt die untere Grenze der aktuellen Empfehlung für die Proteineinnahme nach dem American College of Sports Medicine dar (Rodriguez et al., 2009). Die hohe Proteinmenge spiegelt das Resultat einer kürzlich durchgeführten Studie wider, die anhand der Indikator-Aminosäure-Methode den Proteinbedarf von Ausdauersportlern ermittelte (Kato et al., 2016). Neben der Atemluft für die IAAO-Methode wurde zusätzlich auch der Urin der Probanden gesammelt, um die Stickstoffbilanz berechnen zu können. Die weiteren Stickstoffverluste, wie z.B. durch Schweiß oder Stuhl, wurden anhand bisheriger Veröffentlichungen abgeschätzt (Tarnopolsky et al., 1988; Williamson et al., 2019). Anhand dieser Studie empfehlen Williamson et al. (2019) eine Proteinzufuhr von  $\geq 1,8$  g/kg/KG pro Tag, da in ihrer Studie alle Läufer mit der geringen und moderaten Proteinaufnahme eine negative Stickstoffbilanz zeigten, während sich nur bei der hohen Proteinzufuhr von 1,83 g/kg/KG pro Tag eine positive Netto-Protein-Bilanz einstellte.

Zusammenfassend kann man sagen, dass für Läufer die aktuellen Empfehlungen  $>0,8$  g/kg/KG pro Tag die untere Grenze für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz darstellen. Um eine gesicherte bzw. positive Stickstoffbilanz zu erreichen, sind höhere Zufuhrmengen zwischen 1,14 und 1,83 g/kg/KG pro Tag erforderlich (Friedman & Lemon, 1989; Gaine et al., 2006; Kato et al., 2016; Phillips et al., 1993; Williamson et al., 2019).

## 2.2 *Proteinbedarf von Radfahrern*

Die Proteinbiosynthese ist u.a. abhängig von der Verfügbarkeit an essentiellen Aminosäuren, wie z.B. Leucin. Aus diesem Grund haben Forslund et al. (1999) die Oxidation von Leucin sowie die Protein-, Kohlenhydrat-, Fett- und Energiebilanz über 24 Stunden bei niedriger bis moderater Ausdauerleistung untersucht. Die körperliche Aktivität erstreckte über 7 Tage, wobei zweimal pro Tag ein Fahrradergometertraining über 90 min bei 45-50%  $VO_2$ max absolviert werden musste (Forslund et al., 1999). Hierfür rekrutierten die Autoren insgesamt 14 männliche ambitionierte Freizeitsportler. Acht der 14 Männer erhielten eine normale Proteinzufuhr von 1,0 g/kg Körpergewicht pro Tag, die übrigen 6 Probanden eine erhöhte Zufuhr von 2,5 g/kg/KG pro Tag. Während der 7-tägigen Studiendauer konsumierten alle Sportler eine standardisierte Diät. Am 7. Tag wurden zusätzlich über 24 Stunden hinweg Atem-, Blut- und Urinproben entnommen. Die Ergebnisse zeigten eine leicht negative

Proteinbilanz bei der normalen Proteinzufuhr von 1,0 g/kg/KG pro Tag und eine positive Bilanz bei einer Zufuhrmenge von 2,5 g/kg/KG pro Tag. Zudem waren die Fettoxidation und die Kohlenhydratspeicherung bei der proteinreichen Diät erhöht (Forsslund et al., 1999).

In Anlehnung an die Studie von Forsslund et al., haben el-Koury et al. (1997) mit einem ähnlichen experimentellen Protokoll den Proteindarf ermittelt. Der Unterschied zwischen den beiden Untersuchungen bestand in der Stichprobengröße und in der Proteinzufuhr. In diesem Rahmen wurden 8 junge Männer untersucht, die bei niedriger bis moderater Intensität (ca. 50%  $\text{VO}_2\text{max}$ ) zweimal täglich 90 Minuten auf einem Fahrradergometer trainierten. El-Khoury et al. ermittelten in der 24-h-Leucin-Tracer-Studie eine ausgeglichene Stickstoffbilanz bei einer Proteineinnahme von 1,0 g/kg/KG pro Tag. n (el-Khoury et al., 1997).

Wie auch schon bei den Studien zum Laufen finden sich bei den Radstudien vereinzelt auch Studien mit weiblichen Athleten. Rowlands & Wadsworth (2011) haben in ihrer Studie den Proteinbedarf von weiblichen Radsportlern während intensiver körperlicher Belastung gemessen. Hierzu wurden 12 ausdauertrainierte Fahrradfahrerinnen im Alter von  $30 \pm 7$  Jahren rekrutiert. Das Körpergewicht der Probandinnen lag bei  $60,8 \pm 3,4$  kg (Rowlands & Wadsworth, 2011). Die Radfahrerinnen wiesen eine Trainingserfahrung von  $4,9 \pm 4,1$  Jahren auf, mit einem durchschnittlichen wöchentlichen Trainingspensum von  $12,8 \pm 3,8$  Stunden. Die Hälfte der Frauen nahmen hormonelle Kontrazeptiva ein (Rowlands & Wadsworth, 2011). Die Interventionsgruppe erhielt eine proteinreiche Diät, während die Kontrollgruppe mit einer isokalorischen, proteinarmen Ernährung versorgt wurde. Die Studie bestand aus einem vorbereitendem Fitnessstest und zwei 4-tägigen experimentellen Phasen. Um möglichen Nebeneffekten durch den Menstruationszyklus vorzubeugen, wurde die Studie an die Follikelphase adaptiert, indem zwischen den beiden experimentellen Blöcken eine Pause von 28 Tagen eingehalten wurde (Rowlands & Wadsworth, 2011). An Tag 1 konsumierten die Studienteilnehmerinnen vier Stunden vor der Testung, eine standardisierte, vegetarische Diät mit einem geringen Anteil an Protein. Im Labor absolvierten die Radfahrerinnen ein intensives Intervalltraining mit 80-90% der Maximalleistung. Am Morgen des 2. und 4. Tages bestritten die Athletinnen einen Leistungstest in Form eines Sprints. Der Urin der Teilnehmer wurde nach Beendigung des Trainings an Tag 1 bis zum Start des Tests an Tag 4 gesammelt. Die Stickstoffbilanz wurde zu drei verschiedenen Zeitpunkten während der experimentellen Phase gemessen. Rowlands & Wadsworth (2011) kamen zu dem Ergebnis, dass gut trainierte Radfahrerinnen 1,28 g Protein/kg/KG pro Tag konsumieren sollten, um eine ausgeglichene Stickstoffbilanz zu erhalten.

Dieser erhöhte Proteinbedarf im Radsport wurde auch schon von Brouns et al. (1989) gezeigt. In einer Tour-de-France-Fahrrad-Simulation mit 13 männlichen, gut trainierten Radfahrern ( $\text{VO}_2\text{max}=65,1$  ml/kg/min) ermittelten sie einen Proteinbedarf von 1,5-1,8 g/kg/KG pro Tag, um die Stickstoffbilanz ausgeglichen zu halten (Brouns et al., 1989).

Zusammenfassend lag der Proteinbedarf bei den Studien zum Radfahren für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz zwischen 1,0-1,8 g/kg KG pro Tag (Brouns et al., 1989; el-Khoury et al., 1997; Forslund et al., 1999; Rowlands & Wadsworth, 2011).

### 2.3 *Proteinbedarf von Schwimmern*

Schwimmen ist ein Sport, der sowohl die Ausdauerkapazität als auch die Muskelkraft beansprucht (Mujika, Stellingwerff, & Tipton, 2014). Leistungsschwimmer trainieren bis zu 3-4 Stunden pro Tag und schwimmen eine Gesamtstrecke von bis zu 10000 Metern pro Tag (Costill et al., 1988), Weltklasse-Schwimmer teilweise sogar bis zu 17500 Meter pro Tag (Trappe, Gastaldelli, Jozsi, Troup, & Wolfe, 1997). Auch Aminosäuren werden durch Oxidation als Energiequellen herangezogen und müssen in Form von Nahrungsproteinen wieder aufgenommen werden. Wettkampfschwimmer benötigen durch die hohen Trainingsumfänge eine höhere Proteinzufuhr (Matsuda et al., 2018). Matsuda et al. haben den Proteinbedarf von Leistungsschwimmern während der Wettkampf-Vorbereitungsphase über 5 Tage bestimmt. Insgesamt wurden 13 junge, männliche Schwimmer rekrutiert, die mehr als zehnmal wöchentlich trainierten. Das Alter der Probanden betrug  $19,7 \pm 1,0$  Jahre und das Körpergewicht lag bei  $67,4 \pm 5,1$  kg. An Tag 4 wurde der gesamte produzierte Urin gesammelt, um die Stickstoffbilanz zu bestimmen. Sonstige Stickstoffverluste wie beispielsweise durch Schweiß oder Stuhl wurden anhand bisheriger Werte bei Ausdauersportlern geschätzt. Die Stickstoffbilanz wurde berechnet durch die Differenz der Stickstoffausscheidung und der Stickstoffzufuhr. Das Ergebnis der Stickstoffbilanzmethode zeigte, dass der geschätzte durchschnittliche Proteinbedarf für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz bei 1,43 g/kg Körpergewicht pro Tag liegt. Der bevölkerungssichere Proteinbedarf, der dem 95% Konfidenzintervall des geschätzten Bedarfes entspricht, lag somit bei 1,92 g/kg/KG pro Tag (Matsuda et al., 2018).

### 2.4 *Proteinbedarf bei sonstigen Ausdauersportarten*

Tarnopolsky et al. (1988) untersuchten in ihrer Studie den Proteinbedarf von drei verschiedenen Gruppen bestehend aus jeweils 6 männlichen Testpersonen. Er verglich hierbei eine inaktive Kontrollgruppe mit Ausdauer- und Kraftsportlern. Die Ausdauergruppe, die aus Läufern und Langläufern bestand, wies eine Trainingserfahrung von 5 Jahren auf. Die Bodybuilder hingegen trainierten seit mindestens 3 Jahren regelmäßig und verzichteten zudem in den letzten 2 Jahren auf anabole Steroide (Tarnopolsky et al., 1988).

Während der Studie behielten die Athleten ihr Training bei. Die Kraftsportler trainierten täglich 75 min und die Ausdauerathleten absolvierten ein tägliches Lauftraining (>125 km pro Woche). Jede Gruppe nahm an zwei verschiedenen Experimenten teil. In der ersten Versuchsphase konsumierten die Studienteilnehmer ihre gewöhnliche Ernährung und die Stickstoffbilanz wurde bestimmt. Hierbei zeigte sich, dass die Läufer mit ihrer Basisernährung schon 1,7 g/kg/KG Protein pro Tag aufnehmen. Eine Erhöhung auf 2,65 g/kg/KG führte zu keiner Erhöhung der schon bestehenden posi-

tiven Bilanz. Die abgeleitete Proteinzufuhr für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz betrug für die Ausdauergruppe letztlich 1,37 g Protein/kg/KG pro Tag (Tarnopolsky et al., 1988).

Auch Meredith et al. (1989) führten eine Studie zu dem Proteinbedarf von Ausdauerathleten durch. Hierbei wurde keine spezifische Einteilung in verschiedene Ausdauersportarten vorgenommen. Die Untersuchung beschränkte sich auf 12 gut trainierte, männliche Ausdauersportler, die in zwei Altersgruppen eingeteilt wurden. Die erste Gruppe bestand aus 6 jungen Männern im Alter von 22-30 Jahren ( $VO_{2max}$   $64,8 \pm 2,8$  ml  $O_2$ /kg/KG), die zweite Gruppe setzte sich aus 6 Männern mittleren Alters (48-59 Jahren,  $VO_{2max}$   $55,3 \pm 5,0$  ml  $O_2$ /kg/KG) zusammen. Die Trainingserfahrung der Probanden lag zwischen 2 und 40 Jahren (Meredith et al., 1989). Die Ausdauersportler wurden in drei getrennten 10-Tages-Zeiträumen untersucht. In jeder Trainingsperiode konsumierten sie unterschiedliche Proteinmengen (0,6 g, 0,9 g und 1,2 g/kg/KG pro Tag), die randomisiert und doppelt-verblindet zugeteilt wurden. Die körperlichen Aktivitäten (Radfahren, Laufen, Rudern und/oder Gymnastik) sollten so normal wie möglich gestaltet und täglich dokumentiert werden. Während jeder Phase wurde der tägliche Urin der Probanden gesammelt und der Stuhl wurde in einer 7-Tage-Probe abgegeben. Zusätzlich wurde der Schweißverlust in einem Training bestimmt und eine stündliche Rate für den Stickstoffverlust im Schweiß berechnet. Zwischen den Perioden wurde eine Washout-Pause von 4-11 Tagen eingelegt, in der sich die Studienteilnehmer nach ihren eigenen Vorlieben ernähren sollten (Meredith et al., 1989). Die Stickstoffbilanz wurde jeweils für die letzten 5 Tage jeder Phase berechnet, indem die Differenz zwischen Stickstoffaufnahme und Stickstoffverlust gebildet wurde. Bei einer durchschnittlichen Proteinaufnahme von 0,6 g/kg Körpergewicht/Tag waren alle 12 Männer in einer negativen Stickstoffbilanz. Bei der Proteinzufuhr von 0,9 g/kg Körpergewicht/Tag waren 7 der 12 Sportler in einer negativen Bilanz. Alle Männer, bis auf einen Mann mittleren Alters, waren bei einer Eiweißaufnahme von 1,2 g/kg Körpergewicht/Tag in einer positiven Bilanz. Unabhängig vom Alter lag der Proteinbedarf der Ausdauersportler für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz bei  $0,94 \pm 0,05$  g/kg/KG pro Tag. Die empfohlene Tagesdosis an Protein wäre somit 1,26 g/kg/KG pro Tag. Dies zeigt eine Erhöhung des Proteinbedarfs um 57 Prozent verglichen mit der Empfehlung für die Normalbevölkerung (Meredith et al., 1989).

Houltham & Rowlands (2014) führte bei 10 Fahrradfahrerinnen und Triathletinnen eine 72-stündige Stickstoffbilanzmessung durch. Die Untersuchung fand, wie auch bei Rowlands & Wadsworth (2011), in der mittleren Follikelphase des weiblichen Zyklus statt. Die Stickstoffaufnahme wurde anhand der aufgenommenen Nahrung ermittelt. Die Stickstoffverluste hingegen wurden hier über den Urin bestimmt, wohingegen sonstige Verluste wie Stuhl, Schweiß etc. wie bei vielen anderen Autoren abgeschätzt wurden. Die Probandinnen nahmen einmal eine gewöhnliche Menge Protein zu sich (1,4 g/kg/KG pro Tag) und einmal eine höhere Proteinzufuhr (2,7 g/kg/KG pro Tag). Diese Studie konnte zeigen, dass die Stickstoffbilanz bei der erhöhten Proteinzufuhr positiv und negativ bei der gewöhnlichen Proteineinnahme war. Wodurch



Houltham et al. den Proteinbedarf für die Testpersonen auf 1,63 g/kg/KG pro Tag festlegten (Houltham & Rowlands, 2014).

Auch bei den Studien zu allgemeinen Ausdauersportlern finden sich Untersuchungen mit der IAAO-Methode. Bandegan et al. untersuchten hiermit den Proteinbedarf von männlichen Ausdauersportlern, wobei die Messung erst 24 Stunden nach dem Training durchgeführt, um Einflüsse der vorherigen Trainingseinheit zu minimieren. Es wurden insgesamt 8 Ausdauerathleten (Laufen, Triathlon, Duathlon;  $26,6 \pm 5,8$  Jahre,  $VO_2\text{max}$   $64,1 \pm 3,7$  ml  $O_2$ /kg/min) mit einer Trainingserfahrung von  $\geq 1$  Jahr und Trainingsumfängen von  $\geq 6$  Tagen/Woche mit jeweils 1-1,5 h Training rekrutiert. (Bandegan, Courtney-Martin, Rafii, Pencharz & Lemon, 2019). Die verschiedenen Mengen an Nahrungsprotein wurden in einem Zeitraum von 3 Tagen untersucht (2 Tage Anpassung und 1 Tag IAAO-Messung). In der Anpassungsphase bzw. 2 Tage vor der Messung des Proteinbedarfs nahmen die Versuchsteilnehmer 1,6 g Protein/kg/KG pro Tag zu sich und behielten ihre Trainingsroutine bei. Am 3. Tag wurden die Probanden randomisiert zu den verschiedenen Proteinmengen, die sich zwischen 0,3 und 3,5 g/kg/KG pro betragen, zugeteilt. Die Proteinmenge wurde in Form einer Aminosäuremischung zugeführt. Zusätzlich wurden vor und nach Verabreichung des Tracers Urin- und Atemproben entnommen, um einen stabilen isotopischen Zustand zu gewährleisten. Daraufhin wurde die Oxidation des aufgenommenen L-[1- $^{13}C$ ]Phenylalanin gegenüber der Abgabe von  $^{13}CO_2$  als Reaktion auf die gestaffelte Proteinzufuhr gemessen (Bandegan et al., 2019). Der geschätzte durchschnittliche Proteinbedarf der Männer lag bei 2,1 g/kg/KG pro Tag und das obere 95 Prozent Konfidenzintervall bei 2,6 g/kg/KG pro Tag, welches mit der empfohlenen Tagesdosis gleichgesetzt werden kann (Bandegan et al., 2019).

Die Studien zum Proteinbedarf bei Ausdauerathleten, wie beispielsweise Triathleten, Langläufern etc., kamen zu dem Ergebnis, dass eine Proteinzufuhr zwischen 0,94 und 2,1 g/kg/KG pro Tag für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz sorgt. Zufuhrmengen von 1,26-2,6 g/kg/KG pro Tag resultieren hingegen in einer positiven Bilanz und entsprechen somit der empfohlenen Tagesdosis (Bandegan et al., 2019; Houltham & Rowlands, 2014; Meredith et al., 1989; Tarnopolsky et al., 1988).

### **3 Proteinsupplementierung während Ausdauerbelastungen**

Die Regeneration von körperlichen Belastungen im Training und Wettkampf ist sehr komplex. Sie umfasst die Auffüllung von Energie- und Nährstoffspeichern, die Rehydratation und den Wiederaufbau von Strukturproteinen (Saunders, 2011). All dies kann durch eine entsprechende Ernährung positiv unterstützt werden kann (Beck et al., 2015). Das ist der Grund, weshalb sowohl Freizeitsportler als auch Spitzensportler für eine gut geplante und den Umständen angepasste Ernährung sorgen sollten (Knuiman, Hopman, Verbruggen & Mensink, 2018). Bei Ultralangstreckenrennen,

wie dem Triathlon wird die Ernährung sogar als die „vierte Disziplin“ bezeichnet (Costa, Hoffman & Stellingwerff, 2018).

Um die Leistungsfähigkeit auch während der Belastung zu erhalten und die aufkommende Müdigkeit zu verzögern (Coyle et al., 1983; Jeukendrup, 2004), wird der Verzehr von 30-60g Kohlenhydrate (CHO) pro Stunde bei Sporeinheiten mit einer Dauer von 1-2,5 h und 90g CHO/h bei Einheiten von mehr als 2,5 h (Thomas, Erdman & Burke, 2016) in einer 6-10%igen Lösung alle 10-15 min (Kerksick et al., 2008; Sawka et al., 2007) empfohlen. Das Hinzufügen von Protein in einem Verhältnis von 3-4:1 (CHO:Protein) kann hierbei die Ausdauerleistung erhöhen, die Glykogenresynthese fördern und die Regeneration verbessern (Jäger et al., 2017; Kerksick et al., 2008; Rasmussen, Greenwood, Kalman & Antonio, 2008; Saunders, Kane & Todd, 2004; Thomas et al., 2016). Dabei ist es fraglich, ob die RDA (Recommended Dietary Allowance) für die Proteinaufnahme von 0,8 g/kg BW/d (Institute of Medicine, 2005) auch für das Training von Sportlern ausreicht. Wie oben schon ausführlich dargestellt, empfehlen aus diesem Grund mehrere Autoren eine erhöhte Proteinzufuhr um Muskelproteinsynthese positiv zu halten.

Es gibt mehrere Faktoren, die den Bedarf an diätetischen Protein beeinflussen können. In erster Linie ist es notwendig, die Menge an Protein und dessen Qualität zu betrachten. Aber auch der Zeitpunkt der Einnahme, die Trainingsintensität und -dauer, das Geschlecht und das Alter sind wichtig (Lemon, 1991, 2000). Eine Berücksichtigung all dieser Faktoren macht es sehr schwierig eine zielgerichtete Strategie für Ausdauersportler zu finden, um dessen Leistung zu steigern und die Regeneration zu optimieren. Aus diesem Grund wollen wir uns in diesem Kapitel dem Zeitpunkt der Proteinaufnahme widmen.

Der Einnahmezeitpunkt ist ein wesentlicher Aspekt, der bei jeder Ernährungsstrategie zu berücksichtigen ist. Dies hängt jedoch davon ab, was der Athlet erreichen möchte. Für z.B. eine optimale Wettkampfvorbereitung, liegt der Fokus auf der Ernährung vor und während des Wettkampfes. Ziel ist es, den Körper mit Energie zu versorgen. Die Ernährung nach dem Training wird vor allem zu einem Schlüsselement, wenn die Erholungszeit begrenzt ist. Somit gliedert sich dieses Kapitel in drei Abschnitte: Proteinsupplementierung vor, während und nach der körperlichen Belastung.

### *3.1 Protein-Supplementierung vor der Belastung*

Studien, die die Proteinzufuhr nur vor einer Trainingseinheit untersucht haben, sind selten. Die Mehrheit betrachtete die Protein-Supplementierung davor in Kombination mit einer Ergänzung währenddessen (Beelen et al., 2011; Ivy, Sprague & Widzer, 2003; Knechtle et al., 2012; Schroer, Saunders, Baur, Womack & Luden, 2014).

Eine Stellungnahme der International Society of Sports Nutrition zum Nährstoff-Timing fasste zusammen, dass die Muskelproteinsynthese stimuliert werden kann, wenn eine Menge von 6-20 g EAAs und 30-40 g CHO unmittelbar vor dem Training eingenommen werden (Kerksick et al., 2008). Beelen et al. (2011) kamen zu dem

gleichen Ergebnis. Hier wurde ein Bolus vor der Übung bereitgestellt, um die Magenentleerung zu stimulieren (Beelen et al., 2011). Knechtle et al. (2012) fanden keine Auswirkungen einer BCAA-Supplementierung auf Muskelschäden vor und während eines 100-km-Ultramarathons. Obwohl die BCAA-Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe (~624,3 min vs. ~697,8 min) signifikant schneller das Ziel erreichte, gab es keine Unterschiede bei den klassischen Markern für Muskelschädigungen, wie der CK (Knechtle et al., 2012).

### 3.2 *Protein-Supplementierung während der Belastung*

Es gibt mehrere Studien, die zeigen, dass die Einnahme von CHO in Kombination mit Proteinen während eines längeren Trainings zu einer Verbesserung im sog. Time Trial to Exhaustion (TTE) (Ivy et al., 2003; Saunders et al., 2004; Saunders, Luden & Herrick, 2007; Valentine, Saunders, Todd & St Laurent, 2008) und zu einer Abnahme bei den Markern für Muskelschäden (Saunders et al., 2004; Saunders, Moore, Kies, Luden & Pratt, 2009; Valentine et al., 2008) führen.

Wie waren die einzelnen Ergebnisse in diesen Studien? Ivy et al. (2003) rekrutierten neun trainierte Radfahrer, die sich zunächst für 3 Std. bei 45-75 %  $VO_2max$  belasteten und anschließend TTE bei 85 %  $VO_2max$  absolvierten (Ivy et al., 2003). Die Forscher verglichen in ihrer Studie ein nicht-kalorisches ausgeglichenes Placebo-Getränk mit einem 7,75 % CHO-Getränk und mit Mix-Getränk aus 7,75 % CHO + 1,94 % Protein. Während sich die CHO-Gruppe im TTE im Vergleich zur Placebo-Gruppe um 7 min (19,7 min vs. 12,7 min) verbesserte, zeigte die CHO+PRO-Gruppe eine noch deutliche Leistungsverbesserung um ~14 min (26,9 min) (Ivy et al., 2003). Vergleichbare Ergebnisse zeigten auch Saunders et al. (2004). Sie konnten ebenfalls eine Verbesserung der Zeit im TTE zeigen, wenn Proteine dem CHO-Getränk beigegeben wurden. Die Probanden absolvierten hier einen TTE-Test bei einer Intensität von 75 %  $VO_2max$  und wiederholten das Ganze zwölf bis 15 Stunden später bei 85 %  $VO_2max$ . Die TTE bei 75 %  $VO_2max$  stieg für die CHO+Protein-Gruppe um 29 % und bei 85 %  $VO_2max$  nach der Ruhezeit sogar um 40%. Darüber hinaus wies die CHO+Protein-Gruppe um 83 % verringerte CK-Werte auf (Saunders et al., 2004). Eine weitere Studie von Saunders et al. (2007) mit ähnlichem Studiendesign ergab, dass die Einnahme eines CHO+Protein-Gels die Performance-Zeit erneut um 13 % verbesserte (Saunders et al., 2007).

Basierend auf den Ergebnissen der zuvor genannten Studien verglichen Valentine et al. (2008) ein CHO+Protein-Getränk (7,75 %+1,94 %) mit einem isokalorischen CHO-Getränk (9,69%), einem nicht-isokalorischen CHO-Getränk (7,75%) und einem Placebo-Getränk. Die Studienteilnehmer, elf männliche Radfahrer, nahmen während eines TTE-Tests bei einer Intensität von 75%  $VO_2max$  alle 15 Minuten 250 ml von dem entsprechenden Getränk zu sich. Sowohl das CHO+Protein-Getränk, als auch das isokalorische CHO-Getränk zeigten deutlich längere Zeiten im TTE (18 % bzw. 13 %) als das reine Placebo-Getränk. Die Zeit mit nicht-isokalorischen CHO-Getränks verbesserte sich zwar ebenfalls (9,7 %) im Vergleich zum Placebo-Getränk, dies war aber nicht statistisch signifikant. Bezüglich der Marker für Muskelschäden

wiesen die Radfahrer beim CHO+PRO-Versuch signifikant niedrigere CK-Konzentrationen auf (Valentine et al., 2008).

Hingegen zeigten alle Studien, die einen sog. Time Trial als Leistungskriterium eingesetzt haben, keine Steigerungen der Leistung, wie diese im Time Trial to Exhaustion gezeigt wurde (Finger et al., 2018; van Essen & Gibala, 2006).

In der Summe betrachtet, spielen hier die Studiendesigns bzgl. der Zubereitung der Getränke als auch die Wahl des Leistungstests eine elementare Rolle.

### 3.3 *Protein-Supplementierung nach der Belastung*

Ein CHO+Protein-Getränk nach einer körperlichen Belastung zeigt vielfältige Ergebnisse. So zeigen viele Autoren eine deutlich erhöhte Wiederherstellung des Muskelglykogens (Ivy et al., 2002; Rustad et al., 2016; Williams, Raven, Fogt & Ivy, 2003; Zawadzki, Yaspelkis & Ivy, 1992). Weitere Ergebnisse sind eine höhere Muskelproteinsyntheserate (Breen et al., 2011; Lunn et al., 2012; Rustad et al., 2016), nachträgliche Leistungssteigerungen (Lunn et al., 2012; Rustad et al., 2016; Sollie et al., 2018; Williams et al. 2003) und den positiven Einfluss auf den Plasmaglukosespiegel (Rustad et al., 2016; Sollie et al., 2018; Williams et al., 2003; Zawadzki et al., 1992) und den Plasmainsulinspiegel (Rustad et al., 2016; Sollie et al., 2018; Williams et al., 2003; Zawadzki et al., 1992).

Schon 1992 verglichen Zawadzki und Kollegen unterschiedliche Getränke, um die die Glykogenresynthese zu optimieren. Hierbei verwendeten sie ein reines CHO-, ein Protein- mit und einem Mischgetränk aus CHO und Proteinen, um den Einfluss auf die Speicherung von Muskelglykogen während einer 4-stündigen Erholungsphase nach einer 2-stündigen, glykogenerschöpfenden Ergometereinheit zu untersuchen. Die neun männlichen Probanden erhielten bei drei verschiedenen Terminen entweder das CHO-, das Protein- oder das CHO+Protein-Supplement direkt im Anschluss an die Einheit und nochmals zwei Stunden später. Die Testgetränke wurden im CHO-Gehalt (112 g) bzw. im PRO-Gehalt (40,7 g) aufeinander abgestimmt.

Die Ergebnisse zeigten einen Anstieg des Plasmaglukosespiegels um 47 % nach dem CHO+Protein-Getränk und einen Anstieg um 61 % nach dem reinen CHO-Getränk nach den ersten 30 min der Ruhezeit. Nach Einnahme des reinen Protein-Getränkes veränderten sich die Plasmaglukosespiegel im Vergleich zu den Konzentrationen vor der Übung nicht und lagen daher signifikant unter den Werten in der CHO+Protein- und CHO-Studie. Der Insulinspiegel im CHO+Protein- und im CHO-Versuch lagen während der 4 h Erholungszeit signifikant über Protein-Versuch. Die Muskelglykogenspeicher waren bei allen Versuchen unmittelbar nach dem Training gleichermaßen erschöpft und nach 4 h Ruhezeit konnte kein Unterschied zwischen CHO+Protein und CHO festgestellt werden. Das CHO+Protein-Getränk zeigte jedoch eine 38 % schnellere Resyntheserate des Muskelglykogens als das CHO-Getränk (Zawadzki et al., 1992).

Basierend auf der Studie von Zawadzki et al. (1992) bestätigten Ivy et al. (2002) diese Ergebnisse. Mit einem ähnlichen Studiendesign wurde den Athleten entweder

ein CHO+Protein- (80 g + 28 g), ein CHO-äquilibriertes (80 g) oder ein isokalorisches CHO-Getränk (108 g) verabreicht. Nach einer 4-stündigen Erholungsphase war die gesamte Glykogenwiederherstellung beim CHO+PRO-Versuch, aufgrund einer zwei- bis viermal höheren Syntheserate während der ersten 40 Minuten der Ruhephase, signifikant höher als beim CHO-äquilibrierten und dem isokalorischen Versuch. Innerhalb dieser vier Stunden wurde das verbrauchte Glykogen im CHO+PRO-Versuch für 46,8 % wiederhergestellt, während beim CHO-äquilibrierten und dem isokalorischen CHO-Versuch die Wiederherstellung nur 31,1 %, beziehungsweise 28,0 % betrug (Ivy et al., 2002). Diese Ergebnisse zeigen, dass in Situationen, wo eine schnelle Regeneration erforderlich ist, möglicherweise eine Supplementierung von CHO und Proteinen von Vorteil sind.

Eben dieser Aspekt wurde von Richardson et al. untersucht. Sie kombinierten zwei erschöpfende Time Trials To Exhaustion mit einer begrenzten Regenerationszeit von 3 h. Hierbei hatte ein isokalorisches CHO+Protein-Getränk verglichen zu einem isokalorischen CHO-Getränk keinen signifikanten Einfluss auf die Dauer des zweiten Time Trials (Richardson, Coburn, Beam, & Brown, 2012).

Obwohl Richardson et al. (2012) keine Verbesserung nach der Einnahme eines CHO+Protein- oder eines CHO-Getränks fanden, zeigten andere Studien unterschiedliche Ergebnisse (Lunn et al., 2012; Rustad et al., 2016; Sollie et al., 2018; Williams et al., 2003). So zeigte Rustad et al., dass CHO+Protein-Getränke die Zeit im Time Trial nach einer 18-stündigen Erholungsphase deutlich gegenüber reinen isokalorischen CHO- oder Plazvebo-Getränken verbessert ( $63,5 \pm 4,4$  min vs.  $49,8 \pm 5,4$  min vs.  $42,8 \pm 5,1$  min) (Rustad et al., 2016).

## 4 Diskussion

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit war es, die aktuelle Evidenz zum Proteinbedarf von Ausdauerathleten zusammenzufassen bzw. einen Überblick über die Studienlage zu geben und daraus eine praxisrelevante Handlungsempfehlung abzuleiten. Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) empfiehlt eine Proteinzufuhr von 0,8 g/kg/Tag (Deutsche Gesellschaft für Ernährung, 2017). Von den hier analysierten Studien kamen die meisten zu dem gemeinsamen Konsens, dass die generelle Nährstoffempfehlung für Ausdauersportler zu gering angesetzt ist und eine gesonderte Empfehlung für den Proteinbedarf im Ausdauersport notwendig ist. Zusammenfassend lag der Proteinbedarf für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz zwischen 0,94 und 2,1 g/kg Körpergewicht/Tag. Eine positive Stickstoffbilanz wurde mit einer Proteinzufuhr von 1,14-2,6 g/kg Körpergewicht/Tag erzielt (Bandegan et al., 2019; Brouns et al., 1989; el-Khoury et al., 1997; Forslund et al., 1999; Friedman & Lemon, 1989; Gaine et al., 2006; Houltham & Rowlands, 2014; Kato et al., 2016; Matsuda et al., 2018; Meredith et al., 1989; Phillips et al., 1993; Rowlands & Wadsworth, 2011; Tarnopolsky et al., 1988; Williamson et al., 2019)

Im Ausdauersport ist es besonders wichtig, die Proteinzufuhr richtig zu dosieren und nicht zu hohe bzw. zu geringe Mengen an Protein aufzunehmen, da sich dies unter

Umständen auch negativ auf die Gesundheit sowie die Leistungsfähigkeit des Sportlers auswirken kann (Rodriguez et al., 2009). Eine übermäßige Proteinaufnahme birgt auch negative Aspekte, dazu zählen Nierenschädigungen (Brenner, Meyer & Hostetter, 1982), ein Anstieg des Lipoproteinspiegels im Blut (Risikofaktor für Arteriosklerose) (Carroll, 1982) und Dehydrierung. Letzteres entsteht durch die erhöhte Stickstoffausscheidung im Urin, wodurch es zu einer Steigerung des Urinvolumens kommt (Lemon, 1997). Das wahrscheinlich größte Risiko für Ausdauerathleten, das mit einer erhöhten Proteinzufuhr einhergeht, ist die erforderliche Reduktion der Kohlenhydrataufnahme, um das Energieniveau aufrechtzuerhalten. Daraus resultiert ein niedriger Glykogenspiegel und es kommt zu einer Steigerung der Muskelproteinsynthese. Eine besonders niedrige Proteinaufnahme hingegen führt zu einem Proteindefizit, was zu einem Verlust der Muskelmasse (Atrophie) führen kann (Jeukendrup & Gleeson, 2019).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der eingeschlossenen Studien kamen Butterfield & Calloway (1984) zu dem Schluss, dass Personen, die bereits an das regelmäßige Training adaptiert sind und eine ausgeglichene Energiebilanz aufweisen, keinen erhöhten Proteinbedarf benötigen, um die Stickstoffbilanz aufrechtzuerhalten. In deren Studie wurden untrainierte Probanden untersucht, die 0,57 g Protein/kg/KG pro Tag konsumierten. Im Vergleich zu den anderen Studien war hier aber nur ein leichtes Ausdauertraining (1h/Tag Gehen auf dem Laufband) angesetzt, wo letztlich eine leicht negative Stickstoffbilanz in eine positive umgewandelt wurde (Butterfield & Calloway, 1984). Aufgrund des geringen Umfangs war der Energieaufwand der Ausdauersportler in den hier untersuchten Studien erheblich höher (Bandegan et al., 2019; Brouns et al., 1989; el-Khoury et al., 1997; Forslund et al., 1999; Friedman & Lemon, 1989; Gaine et al., 2006; Houltham & Rowlands, 2014; Kato et al., 2016; Matsuda et al., 2018; Meredith et al., 1989; Phillips et al., 1993; Rowlands & Wadsworth, 2011; Tarnopolsky et al., 1988; Williamson et al., 2019). Eine Reihe von Daten zeigen darüber hinaus, dass bei erhöhter Trainingsdauer und -intensität, der Abbau von Proteinen bzw. die Oxidation von Aminosäuren ansteigt (P. W. Lemon, Nagle, Mullin & Benevenga, 1982; White & Brooks, 1981). Ein weiterer Faktor, der zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann ist letztlich auch die Form und Bioverfügbarkeit der Proteinquellen, die nicht immer einheitlich über die Studien hinweg waren.

Studien, die den Proteinbedarf bei Spportsportarten wie beispielsweise Fußball untersuchten, zeigten ähnliche Ergebnisse wie die hier angeführten Studien. Eine Stickstoffbilanzstudie aus dem Jahr 2002 verglich den Proteinbedarf von 8 nicht aktiven, männlichen Jugendlichen mit dem Bedarf von 11 jugendlichen Fußballspielern. Eine positive Stickstoffbilanz wurde bei den inaktiven Jugendlichen bei 1,57 g Protein/kg Körpergewicht/Tag und bei den aktiven Jugendlichen bei 1,56 g Protein/kg Körpergewicht/Tag erreicht (Boisseau, Le Creff, Loyens & Poortmans, 2002). Eine weitere Studie untersuchte den Bedarf an Protein bei einer Fußballmannschaft, bestehend aus 14-jährigen Jugendlichen ebenfalls mithilfe der Stickstoffbilanzmethode und ermittelte eine empfohlene Tagesdosis von 1,40 g Protein/kg Körpergewicht pro Tag

(Boisseau, Vermorel, Rance, Duche & Patureau-Mirand, 2007). Beide Ergebnisse überstiegen somit die aktuelle Empfehlung für die Proteinzufuhr von Jugendlichen von 0,9 g/kg Körpergewicht pro Tag (Deutsche Gesellschaft für Ernährung, 2017). Darüber hinaus existieren zwei weitere Studien aus dem Jahr 2017, die den Proteinbedarf bei Teamsportarten anhand der neueren Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode ermittelten (Packer et al., 2017; Wooding et al., 2017). Wooding et al. rekrutierte 6 weibliche Sportlerinnen, die nach einer 2-tägigen Anpassungsphase unterschiedliche Proteinmengen zwischen 0,2-2,66 g Protein/kg Körpergewicht pro Tag konsumierten. Aus den Ergebnissen wurde eine empfohlene Tagesdosis von 1,71 g/kg Körpergewicht pro Tag ermittelt (Wooding et al., 2017). Packer et al. (2017) hingegen untersuchten den Proteinbedarf von 7 männlichen Mannschaftsportlern bei einem simulierten Fußballspiel mithilfe der Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode. Nach einer 2-tägigen, kontrollierten Diät mit einer Proteinzufuhr von 1,2 g Protein/kg Körpergewicht/Tag konsumierten die Männer ebenfalls variable Proteinzufuhren zwischen 0,2-2,66 g Protein/kg Körpergewicht/Tag nach Durchführung des „Loughborough Intermittent Shuttle Test“ (4 x 15 Minuten über 75 Minuten). Die empfohlene Tagesdosis an Protein ergab einen Wert von 1,4 g/kg/KG pro Tag (Packer et al., 2017).

Nichtsdestotrotz ist die Validität der Studienergebnisse durch die Nachteile der Stickstoffbilanzmethode begrenzt, die dazu neigt, die Proteinaufnahme zu überschätzen und Proteinausscheidungen zu unterschätzen, woraus eine Unterschätzung des Proteinbedarfs resultiert (Humayun et al., 2007). Hinzu kommt, dass viele der untersuchten Studien lediglich die Stickstoffausscheidung im Urin bestimmt haben und nur eine Schätzung der Stickstoffverluste im Stuhl, Schweiß etc., basierend auf bisherigen Studien, vorgenommen haben (Gaine et al., 2006; Houltham & Rowlands, 2014; Matsuda et al., 2018; Rowlands & Wadsworth, 2011; Williamson et al., 2019). Eine weitere Limitation der Studien ist die geringe Anzahl an Probanden und die zum Teil kurze Dauer der diätischen Phasen.

Auch die vorliegende Arbeit weist einige Schwächen auf. Die Vergleichbarkeit der Studien ist limitiert, die in diesen verschiedenen Methoden der Proteinbedarfsbestimmung herangezogen wurden. 12 der untersuchten Studien (Brouns et al., 1989; el-Khoury et al., 1997; Forslund et al., 1999; Friedman & Lemon, 1989; Gaine et al., 2006; Houltham & Rowlands, 2014; Matsuda et al., 2018; Meredith et al., 1989; Phillips et al., 1993; Rowlands & Wadsworth, 2011; Tarnopolsky et al., 1988; Williamson et al., 2019) ermittelten den Proteinbedarf mithilfe der Stickstoffbilanzmethode und die übrigen 2 Studien (Bandegan et al., 2019; Kato et al., 2016) verwendeten die Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode. Die fehlende Vergleichbarkeit basierend auf dem Geschlechterunterschied in den Studien stellt eine weitere Einschränkung dar. Tarnopolsky erkannte, dass Frauen etwa 15-25 Prozent weniger Protein benötigen, aufgrund von Unterschieden im Aminosäurestoffwechsel (Tarnopolsky, 2004;

Tarnopolsky, 2008). Zudem wären weitere Unterteilungen nach Trainingsstatus, Intensität, Kohlenhydratverfügbarkeit etc. von Vorteil, um differenziertere Empfehlungen bezüglich des Proteinbedarfs von Ausdauersportlern geben zu können. Letztlich sind weitere Untersuchungen von Nöten, um zu verdeutlichen, ob bzw. inwiefern unterschiedliche Trainingsumfänge, Intensitäten, Sportarten oder ernährungsspezifische Einflüsse (z.B. niedrige Energieverfügbarkeit) den Proteinbedarf bei unterschiedlichen Athleten (z.B. Frauen und Männer) beeinflussen (Kato et al., 2016). Vielleicht gibt es auch das Bedürfnis nach einer neuen Methode zur präziseren Quantifizierung des Proteinbedarfs bei körperlicher Aktivität (Bandegan et al., 2019). Für zukünftige Studien wäre außerdem ein Vergleich der Stickstoffbilanzmethode und der Indikator-Aminosäure-Oxidations-Methode in der gleichen Population, bestehend aus Ausdauersportlern, wünschenswert, um die exakten Unterschiede zwischen den beiden Messverfahren berechnen zu können.

## **5 Fazit und praxisrelevante Empfehlungen**

### *5.1 Generelle Proteinzufuhr*

Um eine praxisrelevante Handlungsempfehlung geben zu können, ist eine Unterteilung in Geschlecht und unterschiedliche Intensitäten unumgänglich. Forschungen über den optimalen Proteinbedarf beim Ausdauertraining wurden hauptsächlich an männlichen Probanden durchgeführt. Nichtsdestotrotz wurden in der vorliegenden Arbeit drei Studien (Houltham & Rowlands, 2014; Phillips et al., 1993; Rowlands & Wadsworth, 2011) analysiert, die auch weibliche Probandinnen miteingeschlossen haben. Auch weibliche Ausdauerathletinnen sollten Protein über der aktuellen Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung zuführen, um den Tagesbedarf an Eiweiß zu decken. Eine ausgeglichene Stickstoffbilanz wurde mit einer Proteinzufuhr zwischen 1,28 und 1,63 g/kg Körpergewicht pro Tag erreicht (Houltham & Rowlands, 2014; Phillips et al., 1993; Rowlands & Wadsworth, 2011). Unterschiede zwischen Frauen und Männern existieren vor allem im hormonellen Milieu (Tarnopolsky, 2008) sowie im Aminosäuren-, Glukose- und Fettstoffwechsel (Lamont, 2005; Tarnopolsky, 2000). Frauen oxidieren geringere Mengen an Kohlenhydraten (Tarnopolsky, 2008) und weniger der essenziellen Aminosäure Leucin (Phillips et al., 1993). Jedoch zeigt sich ein dominierender Lipidstoffwechsel mit circa 70 Prozent mehr Fettoxidation während körperlicher Belastung gegenüber Männern (Tarnopolsky, 2004; Tarnopolsky, 2000). Grundsätzlich aber benötigen Frauen ungefähr 15-25 Prozent weniger Protein gegenüber ihren männlichen Kontrahenten (Tarnopolsky, 2004; Tarnopolsky, 2008). Die übrigen Studien (Bandegan et al., 2019; Brouns et al., 1989; el-Khoury et al., 1997; Forslund et al., 1999; Friedman & Lemon, 1989; Gaine et al., 2006; Kato et al., 2016; Matsuda et al., 2018; Meredith et al., 1989; Phillips et al., 1993; Tarnopolsky et al., 1988; Williamson et al., 2019) beschäftigten sich mit dem Proteinbedarf von männlichen Ausdauersportlern. Bei den männlichen Probanden war zusätzlich eine Unterteilung in 3 Kategorien (Freizeitsportler, gut trainierte Sportler und Leis-



tungssportler) unter Betrachtung der maximalen Sauerstoffaufnahme sowie der Trainingsumfänge der Sportler möglich. Der Proteinbedarf von Freizeitsportlern für eine ausgeglichene Stickstoffbilanz lag mit 1,0 g Protein/kg Körpergewicht/Tag nur knapp über der aktuellen Proteinempfehlung der Normalbevölkerung (el-Khoury et al., 1997; Forslund et al., 1999). Gut trainierte Ausdauersportler erzielen eine neutrale Stickstoffbilanz bei einer Proteinaufnahme zwischen 0,94 und 1,43 g/kg Körpergewicht pro Tag (Matsuda et al., 2018; Meredith et al., 1989; Phillips et al., 1993; Williamson et al., 2019). Der geschätzte durchschnittliche Bedarf, ermittelt mit der Indikator-Aminosäure-Oxidation-Messung, lag hingegen in der Gruppe der gut trainierten Sportler zwischen 1,65 und 2,1 g/kg Körpergewicht pro Tag (Bandegan et al., 2019; Kato et al., 2016). Für Spitzensportler ist es angeraten, aufgrund der hohen Trainingsumfänge bzw. -belastungen und der daraus resultierenden erhöhten Oxidation von Aminosäuren (Tarnopolsky, 2004), die aufgenommenen Proteinmengen zu prüfen und ggf. in Abstimmung mit Diätologen zu erhöhen. Eine ausgeglichene Stickstoffbilanz wurde bei den Leistungssportlern bei einer Proteinaufnahme zwischen 1,2 und 1,8 g/kg Körpergewicht pro Tag erreicht (Brouns et al., 1989; Friedman & Lemon, 1989; Gaine et al., 2006; Tarnopolsky et al., 1988). Aufgrund der hier dargestellten Informationen unterschätzt die aktuelle Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung den Proteinbedarf für ausdauertrainierte Sportler und sollte entsprechend überarbeitet werden.

## 5.2 *Timing der Proteinzufuhr*

Die folgenden praxisrelevanten Empfehlungen basieren auf den Daten der überprüften Studien. Gerade bei einer Trainingsdauer von mehr als 60 Minuten spielt die Ernährung eine wichtige Rolle (Rasmussen et al., 2008; Thomas et al., 2016).

Die RDA von 0,8 g/kg/KG Protein pro Tag sollte für 97-98 % der Bevölkerung ausreichend sein (Institute of Medicine, 2005), was sich aber auf Daten von sitzenden oder wenig aktiven Personen bezieht (Lemon, 2000). In dieser Arbeit kommen wir aber zum Schluss, dass die Protein-Anforderungen für trainierte und Elite-Ausdauersportler höher sind als für inaktive Personen.

Natürlich spielt die Versorgung mit Kohlenhydraten und Flüssigkeit im Ausdauersport eine übergeordnete Rolle. Aktuell wird empfohlen während einer 1-2,5 h dauernden Einheit 30-60 g CHO/h zuzuführen. Für Einheiten, die länger als 2,5 h andauern, werden bis zu 90 g/h bzw. 1,0-1,2 g CHO/kg/KG pro Stunde empfohlen (Jeukendrup, 2004; Thomas et al., 2016). Die optimale Nährstoffversorgung sollte hierbei aus einer 6-10%igen Lösung (150-250 ml) alle 10-15 Minuten bestehen (Kerksick et al., 2008; Rasmussen et al., 2008; Saunders et al., 2007; Sawka et al., 2007; Thomas et al., 2016; Valentine et al., 2008).

Bzgl. der Proteinversorgung ist es in der Regel ausreichend, wenn die Zufuhr über den Tag verteilt wird. Aber in der Literatur existieren Hinweise, dass eine getimte Proteinzufuhr positive Effekte im Ausdauersport zeigen kann. So haben Beelen et al. gezeigt, dass die Einnahme eines Bolus (hier: 6 ml/kg BW) von CHO und Protein vor

dem Training die Magenentleerung stimulieren und somit die Versorgung erhöhen kann (Beelen et al., 2011).

Es konnte zudem gezeigt werden, dass eine Proteinsupplementierung während der Ausdauerbelastung positiv sein kann. Hierfür sollte das Mischungsverhältnis 3-4:1 (CHO:Protein) betragen (Ivy et al., 2003; Jäger et al., 2017; Kerksick et al., 2008; Rasmussen et al., 2008; Saunders et al., 2004; Saunders et al., 2007; Thomas et al., 2016; Valentine et al., 2008). Eine Proteinsupplementierung während der Belastung sollte aber, ähnlich wie die Verwendung von Fruktose, vorher getestet werden, denn auch Proteine können während der körperlichen Belastung zu gastro-intestinalen Problemen führen.

Bleibt noch die Frage, was wir in der Nachbelastungsphase verbessern können. Hier ist die Einnahme von 0,25-0,3 g/kg/KG pro Stunde von qualitativ hochwertigem Protein unmittelbar nach der Belastung (in den ersten 2 h) (Jäger et al., 2017; Thomas et al., 2016) und 1,2-1,6 g/kg/KG pro Stunde an CHO empfohlen (Ivy et al., 2002; Richardson et al., 2012; Zawadzki et al., 1992). Zudem wurde gezeigt, dass regelmäßige Portionen (alle 30 Minuten für 2 h) in der Nachbelastungsphase die Wiederauffüllung der Glykogenspeicher begünstigen und die nachfolgenden Leistungen verbessern (Richardson et al., 2012; Rustad et al., 2016; Sollie et al., 2018). Zudem kann eine Ergänzung von Proteinen in der Nachbelastungsphase die Glykogensynthese zusätzlich beschleunigen (Ivy et al., 2002; Zawadzki et al., 1992; Houston, 2006). Und wie schon Cintineo et al. festgestellt haben, ist die schlechteste Strategie nach der körperlichen Anstrengung nichts zu sich zu nehmen (Cintineo, Arent, Antonio & Arent, 2018).

## 6 Literatur

- Bandegan, A., Courtney-Martin, G., Rafii, M., Pencharz, P. B. & Lemon, P. W. (2019). Indicator Amino Acid Oxidation Protein Requirement Estimate in Endurance-Trained Men 24h Post-Exercise Exceeds both the EAR and Current Athlete Guidelines. *Am J Physiol Endocrinol Metab.*, 316 (5), E741-E748. doi:10.1152/ajpendo.00174.2018
- Beck, K. L., Thomson, J. S., Swift, R. J. & von Hurst, P. R. (2015). Role of nutrition in performance enhancement and postexercise recovery. *Open Access J Sports Med*, 6, 259-267. doi:10.2147/oajsm.S33605
- Beelen, M., Zorenc, A., Pennings, B., Senden, J. M., Kuipers, H. & van Loon, L. J. (2011). Impact of protein coingestion on muscle protein synthesis during continuous endurance type exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 300(6), E945-E954. doi:10.1152/ajpendo.00446.2010
- Boirie, Y., Dangin, M., Gachon, P., Vasson, M. P., Maubois, J. L., & Beaufriere, B. (1997). Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 94 (26), 14930-14935. doi:10.1073/pnas.94.26.14930
- Boisseau, N., Le Creff, C., Loyens, M. & Poortmans, J. R. (2002). Protein intake and nitrogen balance in male non-active adolescents and soccer players. *Eur J Appl Physiol*, 88 (3), 288-293. doi:10.1007/s00421-002-0726-x
- Boisseau, N., Vermorel, M., Rance, M., Duche, P. & Patureau-Mirand, P. (2007). Protein requirements in male adolescent soccer players. *Eur J Appl Physiol*, 100 (1), 27-33. doi:10.1007/s00421-007-0400-4
- Breen, L., Philp, A., Witard, O. C., Jackman, S. R., Selby, A., Smith, K., . . . Tipton, K. D. (2011). The influence of carbohydrate-protein co-ingestion following endurance exercise on myofibrillar and mitochondrial protein synthesis. *J Physiol*, 589 (Pt 16), 4011-4025. doi:10.1113/jphysiol.2011.211888

- Brenner, B. M., Meyer, T. W. & Hostetter, T. H. (1982). Dietary protein intake and the progressive nature of kidney disease: the role of hemodynamically mediated glomerular injury in the pathogenesis of progressive glomerular sclerosis in aging, renal ablation, and intrinsic renal disease. *N Engl J Med*, 307 (11), 652-659. doi:10.1056/nejm198209093071104
- Brouns, F., Saris, W. H., Stroecken, J., Beckers, E., Thijssen, R., Rehrer, N. J. & ten Hoor, F. (1989). Eating, drinking, and cycling. A controlled Tour de France simulation study, Part II. Effect of diet manipulation. *Int J Sports Med*, 10 Suppl 1, S41-48. doi:10.1055/s-2007-1024953
- Butterfield, G. E. & Calloway, D. H. (1984). Physical activity improves protein utilization in young men. *Br J Nutr*, 51 (2), 171-184. doi:10.1079/bjn19840021
- Carroll, K. K. (1982). Hypercholesterolemia and atherosclerosis: Effects of dietary protein. *Fed Proc*, 41 (11), 2792-2796.
- Cathcart, A. J., Murgatroyd, S. R., McNab, A., Whyte, L. J. & Easton, C. (2011). Combined carbohydrate-protein supplementation improves competitive endurance exercise performance in the heat. *Eur J Appl Physiol*, 111 (9), 2051-2061. doi:10.1007/s00421-011-1831-5
- Cintineo, H. P., Arent, M. A., Antonio, J. & Arent, S. M. (2018). Effects of Protein Supplementation on Performance and Recovery in Resistance and Endurance Training. *Front Nutr*, 5 (83). doi:10.3389/fnut.2018.00083
- Costa, R. J. S., Hoffman, M. D. & Stellingwerff, T. (2018). Considerations for ultra-endurance activities: part 1- nutrition. *Res Sports Med*, 1-16. doi:10.1080/15438627.2018.1502188
- Costill, D. L., Flynn, M. G., Kirwan, J. P., Houmard, J. A., Mitchell, J. B., Thomas, R. & Park, S. H. (1988). Effects of repeated days of intensified training on muscle glycogen and swimming performance. *Med Sci Sports Exerc*, 20 (3), 249-254.
- Coyle, E. F., Hagberg, J. M., Hurley, B. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A. & Holloszy, J. O. (1983). Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 55 (1 Pt 1), 230-235. doi:10.1152/jappl.1983.55.1.230
- Deutsche Gesellschaft für Ernährung (2017). *Ausgewählte Fragen und Antworten zu Protein und unentbehrlichen Aminosäuren*. Retrieved from <https://www.dge.de/wissenschaft/weiterepublikationen/faqs/protein/>
- el-Khoury, A. E., Forslund, A., Olsson, R., Branth, S., Sjodin, A., Andersson, A., . . . Young, V. R. (1997). Moderate exercise at energy balance does not affect 24-h leucine oxidation or nitrogen retention in healthy men. *Am J Physiol*, 273 (2 Pt 1), E394-407. doi:10.1152/ajpendo.1997.273.2.E394
- Elango, R., Ball, R. O. & Pencharz, P. B. (2012). Recent advances in determining protein and amino acid requirements in humans. *Br J Nutr*, 108 Suppl 2, S22-30. doi:10.1017/s0007114512002504
- Finger, D., Lanferdini, F. J., Farinha, J. B., Brusco, C. M., Helal, L., Boeno, F. P., . . . Pinto, R. S. (2018). Ingestion of carbohydrate or carbohydrate plus protein does not enhance performance during endurance exercise: a randomized crossover placebo-controlled clinical trial. *Appl Physiol Nutr Metab*, 43 (9), 937-944. doi:10.1139/apnm-2017-0835
- Forbes, G. B. (1973). Another source of error in the metabolic balance method. *Nutr Rev*, 31 (10), 297-300. doi:10.1111/j.1753-4887.1973.tb07026.x
- Forslund, A. H., El-Khoury, A. E., Olsson, R. M., Sjodin, A. M., Hambraeus, L. & Young, V. R. (1999). Effect of protein intake and physical activity on 24-h pattern and rate of macronutrient utilization. *Am J Physiol*, 276 (5), E964-976. doi:10.1152/ajpendo.1999.276.5.E964
- Friedman, J. E. & Lemon, P. W. (1989). Effect of chronic endurance exercise on retention of dietary protein. *Int J Sports Med*, 10 (2), 118-123. doi:10.1055/s-2007-1024886
- Gainey, P. C., Picosky, M. A., Martin, W. F., Bolster, D. R., Maresh, C. M. & Rodriguez, N. R. (2006). Level of dietary protein impacts whole body protein turnover in trained males at rest. *Metabolism*, 55 (4), 501-507. doi:10.1016/j.metabol.2005.10.012
- Hasler, C. M. (2000). The changing face of functional foods. *J Am Coll Nutr*, 19 (5 Suppl), 499s-506s.
- Hasler, C. M. (2002). The cardiovascular effects of soy products. *J Cardiovasc Nurs*, 16 (4), 50-63; quiz 75-56.
- Ho, S. C., Woo, J., Lam, S., Chen, Y., Sham, A. & Lau, J. (2003). Soy protein consumption and bone mass in early postmenopausal Chinese women. *Osteoporos Int*, 14 (10), 835-842. doi:10.1007/s00198-003-1453-9
- Hoffman, J. R. & Falvo, M. J. (2004). Protein - Which is Best? *J Sports Sci Med*, 3(3), 118-130.

- Houltham, S. D. & Rowlands, D. S. (2014). A snapshot of nitrogen balance in endurance-trained women. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism-Physiologie Appliquee Nutrition Et Metabolisme*, 39 (2), 219-225. doi:10.1139/apnm-2013-0182
- Houston, M. E. (2006). *Biochemistry primer for exercise science*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Hu, F. B., Stampfer, M. J., Rimm, E. B., Manson, J. E., Ascherio, A., Colditz, G. A., . . . Willett, W. C. (1999). A prospective study of egg consumption and risk of cardiovascular disease in men and women. *Jama*, 281 (15), 1387-1394. Retrieved from <https://jamanetwork.com/journals/jama/articlepdf/189529/joc81683.pdf>
- Humayun, M. A., Elango, R., Ball, R. O. & Pencharz, P. B. (2007). Reevaluation of the protein requirement in young men with the indicator amino acid oxidation technique. *Am J Clin Nutr*, 86 (4), 995-1002. doi:10.1093/ajcn/86.4.995
- Institute of Medicine of the National Academies. (2002). *Dietary reference intakes for energy, carbohydrates, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids (macronutrients)*. Washington, DC: National Academies Press.
- Ivy, J. L., Goforth, H. W., Jr., Damon, B. M., McCauley, T. R., Parsons, E. C. & Price, T. B. (2002). Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *J Appl Physiol* (1985), 93 (4), 1337-1344. doi:10.1152/jappphysiol.00394.2002
- Ivy, J. L., Sprague, R. C. & Widzer, M. O. (2003). Effect of a carbohydrate-protein supplement on endurance performance during exercise of varying intensity. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism*, 13 (3), 382-395.
- Jager, R., Kerksick, C. M., Campbell, B. I., Cribb, P. J., Wells, S. D., Skwiat, T. M., . . . Antonio, J. (2017). International Society of Sports Nutrition Position Stand: protein and exercise. *J Int Soc Sports Nutr*, 14, 20. doi:10.1186/s12970-017-0177-8
- Jeukendrup, A. & Gleeson, M. (2019). *Sport Nutrition* (3rd ed.). Champaign: Human Kinetics.
- Jeukendrup, A. E. (2004). Carbohydrate intake during exercise and performance. *Nutrition*, 20 (7-8), 669-677. doi:10.1016/j.nut.2004.04.017
- Kato, H., Suzuki, K., Bannai, M. & Moore, D. R. (2016). Protein Requirements Are Elevated in Endurance Athletes after Exercise as Determined by the Indicator Amino Acid Oxidation Method. *PLoS One*, 11 (6), e0157406. doi:10.1371/journal.pone.0157406
- Kerksick, C., Harvey, T., Stout, J., Campbell, B., Wilborn, C., Kreider, R., . . . Antonio, J. (2008). International Society of Sports Nutrition position stand: nutrient timing. *J Int Soc Sports Nutr*, 5, 17. doi:10.1186/1550-2783-5-17
- Knechtle, B. (2002). *Aktuelle Sportphysiologie*. Basel [u.a.]: Karger.
- Knechtle, B., Mrazek, C., Wirth, A., Knechtle, P., Rust, C. A., Senn, O., . . . Ballmer, P. (2012). Branched-chain amino acid supplementation during a 100-km ultra-marathon--a randomized controlled trial. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*, 58 (1), 36-44. Retrieved from [https://www.jst-age.jst.go.jp/article/jnsv/58/1/58\\_36/\\_pdf](https://www.jst-age.jst.go.jp/article/jnsv/58/1/58_36/_pdf)
- Knödlseeder, K. (2019). *Protein requirements in endurance sports*. (BSc Systematic Review). Technical University of Munich, Munich.
- Knuiman, P., Hopman, M. T. E., Verbruggen, C. & Mensink, M. (2018). Protein and the Adaptive Response With Endurance Training: Wishful Thinking or a Competitive Edge? *Front Physiol*, 9, 598. doi:10.3389/fphys.2018.00598
- Lamont, L. S. (2005). Gender differences in amino acid use during endurance exercise. *Nutr Rev*, 63(12 Pt 1), 419-422.
- Lemon, P. W. (1991). Effect of exercise on protein requirements. *J Sports Sci*, 9 Spec No, 53-70. doi:10.1080/02640419108729866
- Lemon, P. W. (2000). Beyond the zone: protein needs of active individuals. *J Am Coll Nutr*, 19(5 Suppl), 513s-521s.
- Lemon, P. W., Nagle, F. J., Mullin, J. P. & Benevenga, N. J. (1982). In vivo leucine oxidation at rest and during two intensities of exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 53 (4), 947-954. doi:10.1152/jappl.1982.53.4.947
- Lemon, P. W. R. (1997). Dietary protein requirements in athletes. *Journal of Nutritional Biochemistry*, 8 (2), 52-60. doi:10.1016/s0955-2863(97)00007-7
- Lunn, W. R., Pasiakos, S. M., Colletto, M. R., Karfonta, K. E., Carbone, J. W., Anderson, J. M. & Rodriguez, N. R. (2012). Chocolate milk and endurance exercise recovery: protein balance, glycogen, and performance. *Med Sci Sports Exerc*, 44 (4), 682-691. doi:10.1249/MSS.0b013e3182364162

- Magkos, F. & Yannakoulia, M. (2003). Methodology of dietary assessment in athletes: concepts and pitfalls. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*, 6 (5), 539-549. doi:10.1097/01.mco.0000087969.83880.97
- Matsuda, T., Kato, H., Suzuki, H., Mizugaki, A., Ezaki, T. & Ogita, F. (2018). Within-Day Amino Acid Intakes and Nitrogen Balance in Male Collegiate Swimmers during the General Preparation Phase. *Nutrients*, 10 (11). doi:10.3390/nu10111809
- McArdle, W. D., Katch, F. I. & Katch, V. L. (2009). *Sports and exercise nutrition*. Philadelphia, Pa. [u.a.]: Wolters Kluwer [u.a.].
- Meredith, C. N., Zackin, M. J., Frontera, W. R. & Evans, W. J. (1989). Dietary protein requirements and body protein metabolism in endurance-trained men. *J Appl Physiol* (1985), 66 (6), 2850-2856. doi:10.1152/jappl.1989.66.6.2850
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. & Group, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med*, 6 (7), e1000097. doi:10.1371/journal.pmed.1000097
- Mujika, I., Stellingwerff, T. & Tipton, K. (2014). Nutrition and Training Adaptations in Aquatic Sports. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 24 (4), 414-424. doi:10.1123/ijsnem.2014-0033
- Murkies, A. L., Lombard, C., Strauss, B. J., Wilcox, G., Burger, H. G. & Morton, M. S. (1995). Dietary flour supplementation decreases post-menopausal hot flashes: effect of soy and wheat. *Maturitas*, 21 (3), 189-195. Retrieved from [https://www.maturitas.org/article/0378-5122\(95\)00899-V/pdf](https://www.maturitas.org/article/0378-5122(95)00899-V/pdf)
- Packer, J. E., Wooding, D. J., Kato, H., Courtney-Martin, G., Pencharz, P. B. & Moore, D. R. (2017). Variable-Intensity Simulated Team-Sport Exercise Increases Daily Protein Requirements in Active Males. *Front Nutr*, 4, 64. doi:10.3389/fnut.2017.00064
- Phillips, S. M. (2004). Protein requirements and supplementation in strength sports. *Nutrition*, 20 (7-8), 689-695. doi:10.1016/j.nut.2004.04.009
- Phillips, S. M., Atkinson, S. A., Tarnopolsky, M. A. & MacDougall, J. D. (1993). Gender differences in leucine kinetics and nitrogen balance in endurance athletes. *J Appl Physiol* (1985), 75 (5), 2134-2141. doi:10.1152/jappl.1993.75.5.2134
- Rand, W. M., Pellett, P. L. & Young, V. R. (2003). Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults. *Am J Clin Nutr*, 77 (1), 109-127. doi:10.1093/ajcn/77.1.109
- Rasmussen, C., Greenwood, M., Kalman, D. & Antonio, J. (2008). Nutritional Supplements for Endurance Athletes. In: M. Greenwood, D. Kalman & J. Antonio (Eds.). *Nutritional Supplements in Sports and Exercise* (pp. 369-407). Humana Press
- Rehner, G. & Daniel, H. (1999). *Biochemie der Ernährung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Richardson, K. L., Coburn, J. W., Beam, W. C. & Brown, L. E. (2012). Effects of isocaloric carbohydrate vs. carbohydrate-protein supplements on cycling time to exhaustion. *J Strength Cond Res*, 26 (5), 1361-1365. doi:10.1519/JSC.0b013e318248d774
- Rodriguez, N. R., Di Marco, N. M. & Langley, S. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*, 41 (3), 709-731. doi:10.1249/MSS.0b013e31890eb86
- Rowlands, D. S. & Wadsworth, D. P. (2011). Effect of High-Protein Feeding on Performance and Nitrogen Balance in Female Cyclists. *Med Sci Sports Exerc*, 43 (1), 44-53. doi:10.1249/MSS.0b013e3181e93316
- Rustad, P. I., Sailer, M., Cumming, K. T., Jeppesen, P. B., Kolnes, K. J., Sollie, O., . . . Jensen, J. (2016). Intake of Protein Plus Carbohydrate during the First Two Hours after Exhaustive Cycling Improves Performance the following Day. *PLoS One*, 11 (4), e0153229. doi:10.1371/journal.pone.0153229
- Saunders, M. J. (2011). Carbohydrate-protein intake and recovery from endurance exercise: is chocolate milk the answer? *Curr Sports Med Rep*, 10 (4), 203-210. doi:10.1249/JSR.0b013e318223ccb4
- Saunders, M. J., Kane, M. D. & Todd, M. K. (2004). Effects of a carbohydrate-protein beverage on cycling endurance and muscle damage. *Med Sci Sports Exerc*, 36 (7), 1233-1238.
- Saunders, M. J., Luden, N. D. & Herrick, J. (2007). Consumption of an Oral Carbohydrate-Protein Gel Improves Cycling Endurance and Prevents Postexercise Muscle Damage. *J Strength Cond Res*, 21 (3), 678-84.

- Saunders, M. J., Moore, R. W., Kies, A. K., Luden, N. D. & Pratt, C. A. (2009). Carbohydrate and protein hydrolysate coingestions improvement of late-exercise time-trial performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 19 (2), 136-149.
- Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J. & Stachenfeld, N. S. (2007). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc*, 39 (2), 377-390. doi:10.1249/mss.0b013e31802ca597
- Schroer, A. B., Saunders, M. J., Baur, D. A., Womack, C. J. & Luden, N. D. (2014). Cycling time trial performance may be impaired by whey protein and L-alanine intake during prolonged exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 24 (5), 507-515. doi:10.1123/ijnsnem.2013-0173
- Smith, K. & Rennie, M. J. (1996). The measurement of tissue protein turnover. *Baillieres Clin Endocrinol Metab*, 10 (4), 469-495.
- Sollie, O., Jeppesen, P. B., Tangen, D. S., Jernerren, F., Nellesmann, B., Valsdottir, D., . . . Jensen, J. (2018). Protein intake in the early recovery period after exhaustive exercise improves performance the following day. *J Appl Physiol* (1985). doi:10.1152/jappphysiol.01132.2017
- Symons, T. B., Schutzler, S. E., Cocke, T. L., Chinkes, D. L., Wolfe, R. R. & Paddon-Jones, D. (2007). Aging does not impair the anabolic response to a protein-rich meal. *Am J Clin Nutr*, 86 (2), 451-456. doi:10.1093/ajcn/86.2.451
- Tarnopolsky, M. (2004). Protein requirements for endurance athletes. *Nutrition*, 20 (7-8), 662-668. doi:10.1016/j.nut.2004.04.008
- Tarnopolsky, M. A. (2000). Gender differences in substrate metabolism during endurance exercise. *Can J Appl Physiol*, 25 (4), 312-327.
- Tarnopolsky, M. A. (2008). Sex differences in exercise metabolism and the role of 17-beta estradiol. *Med Sci Sports Exerc*, 40 (4), 648-654. doi:10.1249/MSS.0b013e31816212ff
- Tarnopolsky, M. A., MacDougall, J. D. & Atkinson, S. A. (1988). Influence of protein intake and training status on nitrogen balance and lean body mass. *J Appl Physiol* (1985), 64 (1), 187-193. doi:10.1152/jappl.1988.64.1.187
- Thomas, D. T., Erdman, K. A. & Burke, L. M. (2016). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and Athletic Performance. *J Acad Nutr Diet*, 116 (3), 501-528. doi:10.1016/j.jand.2015.12.006
- Trappe, T. A., Gastaldelli, A., Jozsi, A. C., Troup, J. P. & Wolfe, R. R. (1997). Energy expenditure of swimmers during high volume training. *Med Sci Sports Exerc*, 29 (7), 950-954.
- Valentine, R. J., Saunders, M. J., Todd, M. K. & St Laurent, T. G. (2008). Influence of carbohydrate-protein beverage on cycling endurance and indices of muscle disruption. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 18 (4), 363-378.
- van Essen, M. & Gibala, M. J. (2006). Failure of protein to improve time trial performance when added to a sports drink. *Med Sci Sports Exerc*, 38 (8), 1476-1483. doi:10.1249/01.mss.0000228958.82968.0a
- Weineck, A. & Weineck, J. (2010). *Leistungskurs Sport, Band II - Sportbiologische und trainingswissenschaftliche Grundlagen* (Vol. 2). Waldkirchen: Südost Verlags Service GmbH.
- White, T. P. & Brooks, G. A. (1981). [U-14C]glucose, -alanine, and -leucine oxidation in rats at rest and two intensities of running. *Am J Physiol*, 240(2), E155-165. doi:10.1152/ajpendo.1981.240.2.E155
- Williams, M., Raven, P. B., Fogt, D. L. & Ivy, J. L. (2003). Effects of recovery beverages on glycogen restoration and endurance exercise performance. *J Strength Cond Res*, 17 (1), 12-19.
- Williamson, E., Kato, H., Volterman, K. A., Suzuki, K. & Moore, D. R. (2018). The Effect of Dietary Protein on Protein Metabolism and Performance in Endurance-trained Males. *Med Sci Sports Exerc*. doi:10.1249/mss.0000000000001791
- Williamson, E., Kato, H., Volterman, K. A., Suzuki, K. & Moore, D. R. (2019). The Effect of Dietary Protein on Protein Metabolism and Performance in Endurance-trained Males. *Med Sci Sports Exerc*, 51 (2), 352-360. doi:10.1249/mss.0000000000001791
- Wolf, R. (2019). *What is the best strategy for protein supplementation in endurance sports to increase performance and optimize recovery?* (BSc Systematic Review). Technical University of Munich, Munich.
- Wooding, D. J., Packer, J. E., Kato, H., West, D. W. D., Courtney-Martin, G., Pencharz, P. B. & Moore, D. R. (2017). Increased Protein Requirements in Female Athletes after Variable-Intensity Exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 49 (11), 2297-2304. doi:10.1249/mss.0000000000001366

- Wu, A. H., Ziegler, R. G., Nomura, A. M., West, D. W., Kolonel, L. N., Horn-Ross, P. L., . . . Pike, M. C. (1998). Soy intake and risk of breast cancer in Asians and Asian Americans. *Am J Clin Nutr*, 68 (6 Suppl), 1437s-1443s. doi:10.1093/ajcn/68.6.1437S
- Young, V. R., Bier, D. M. & Pellett, P. L. (1989). A theoretical basis for increasing current estimates of the amino acid requirements in adult man, with experimental support. *Am J Clin Nutr*, 50 (1), 80-92. doi:10.1093/ajcn/50.1.80
- Zawadzki, K. M., Yaspelkis, B. B., 3rd & Ivy, J. L. (1992). Carbohydrate-protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol* (1985), 72 (5), 1854-1859. doi:10.1152/jappl.1992.72.5.1854