



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

**Die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf ausgewählte Parameter
der Gesundheit männlicher Athleten – Eine systematische Literaturrecherche**

Bachelorarbeit

im Studiengang Ökotrophologie

Vorgelegt von

Paula Medina Werner

Hamburg

25. Januar 2023

1. Gutachterin: Prof. Dr. Anja Carlsohn
2. Gutachterin: Prof. Dr. Nina Riedel

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Zusammenfassung	1
Abstract	2
1. Theoretischer Hintergrund	3
<i>1.1 Zielsetzung</i>	4
<i>1.2 Energiebedarf und Energieverbrauch</i>	4
<i>1.3 Energieverfügbarkeit</i>	5
<i>1.4 Endokrine Funktionen</i>	8
<i>1.5 Knochengesundheit</i>	10
<i>1.6 Fortpflanzungsfunktion</i>	13
2. Methode	14
3. Ergebnisse	16
<i>3.1 Körpergewicht und -zusammensetzung</i>	17
<i>3.2 Endokrine Funktion</i>	21
<i>3.3 Knochengesundheit</i>	22
<i>3.4 Fortpflanzungsfunktion</i>	25
4. Diskussion	27
<i>4.1 Methodendiskussion</i>	27
<i>4.2 Ergebnisdiskussion</i>	28
4.2.1 Energieverfügbarkeit	28
4.2.2 Körpergewicht und -zusammensetzung	29
4.2.3 Endokrine Funktion	30
4.2.4 Knochengesundheit	31
4.2.5 Fortpflanzungsfunktion	34
<i>4.3 Studiendesign</i>	36

4.3.1 Stichproben	36
4.3.2 Interventionslänge	38
4.3.3 Drop-out Rate	39
4.3.4 Limitationen	39
5. Schlussfolgerung und Ausblick	41
Literaturverzeichnis	42
Anhang	45
I. <i>Flow-Chart</i>	45
II. <i>PICOR-Tabelle</i>	46
III. <i>Eidesstattliche Erklärung</i>	51

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung der täglichen Energiebilanz und Energieverfügbarkeit (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).....	6
Abbildung 2: Gesundheitliche Folgen von einem relativen Energiedefizit im Sport (RED-S). Eigene Darstellung, modifiziert nach: Mountjoy, et al., 2018	7
Abbildung 3: Potenzielle Leistungseffekte von einem relativen Energiedefizit im Sport (RED-S). Eigene Darstellung, modifiziert nach: Mountjoy, et al., 2018	8
Abbildung 4: Teil der Hypothalamus-Hypophyse. Eigene Darstellung, modifiziert nach: Arafat, 2016 (S. 401-e2).....	9
Abbildung 5: Hypothalamus-Hypophyse-Gonadal-Achse (Logue, et al., 2020).....	14
Tabelle 1: Definitionen der unterschiedlichen Knochendichten laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Eigene Darstellung, modifiziert nach: Roth, et al., 2000.....	12
Tabelle 2: Recherchevorgang - Ausgewählte Studien	16
Tabelle 3: Ergebnisse zum Körpergewicht und -zusammensetzung.....	20
Tabelle 4: Ergebnisse zu Parametern der endokrinen Funktion.....	22
Tabelle 5: Ergebnisse zu Parametern der Knochengesundheit	25
Tabelle 6: Ergebnisse zu Parametern der Fortpflanzungsfunktion	26
Tabelle 7: Ein- und Ausschlusskriterien	37

Abkürzungsverzeichnis

ACTH	Adrenokortikotropes Hormon
BIA	Bioelektrische Impedanzanalyse
BMI	Body-Mass-Index
CON	Kontrollgruppe
CRC	Caloric restriction + carbohydrate
CRP	Caloric restriction + protein
CTX	Carboxyterminale Kollagen-Crosslinks
DHEA-S	Dehydroepiandrosteron-Sulfat
DIT	Dietary-Induced Thermogenesis, Nahrung induzierte Thermogenese
DXA	Dual Energy X-Ray Absorptiometrie, Doppelröntgenabsorptiometrie
EEE	Exercise Energy Expenditure, Energieverbrauch im Training
EHMC	Exercise Hypogonadal Male Condition
EX	Exercise, Training
FFM	Fat Free Mass, Fettfreie Körpermasse
FSH	Follikelstimulierendes Hormon
GE	Geringe Energieverfügbarkeit
GH	Growth Hormone, Wachstumshormon
IGF-1	Insulin-like Growth Factor-1, Insulinähnlicher Wachstumsfaktor-1
IOC	International Olympic Committee
KG	Körpergewicht
LEA	Low Energy Availability
LH	Luteinisierendes Hormon
MET	Metabolischer Äquivalent
NEAT	Non-Exercise Activity Thermogenesis, Sportunabhängige Aktivitätsthermogenese
P1NP	Prokollagen-Typ-1-N-terminales Propeptid
PAL	Physical Activity Level
PICOR	Problem-Intervention-Control-Outcome-Results
RCT	Randomized Controlled Trial, Randomisierte Kontrollstudie
RED-S	Relative Energy Deficiency in Sport
RMR	Resting Metabolic Rate, Ruhestoffwechselrate
SD	Standardabweichung
β -CTX	β -Carboxyterminale Kollagen-Crosslinks
T3	Trijodthyronin
TSH	Thyreotropin
WHO	Weltgesundheitsorganisation

Zusammenfassung

Beim Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) handelt es sich um ein Syndrom, welches aus einem relativen Energiemangel resultiert und sich auf viele physiologische Funktionen auswirkt (Mountjoy, et al., 2014). Lange wurde das Syndrom nur mit Frauen in Verbindung gebracht, doch auch Männer können von einem relativen Energiedefizit betroffen sein (Mountjoy, et al., 2014). In dieser systematischen Literaturrecherche sollen die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit (< 30 kcal/kg FFM/Tag) auf bestimmte Gesundheitsparameter der endokrinen Funktion, Knochengesundheit und Fortpflanzungsfunktion bei männlichen Sportlern vorgestellt, verglichen und diskutiert werden. Um die Forschungsfrage zu beantworten, wurden die Datenbanken PubMed.gov, Google Scholar und ScienceDirect herangezogen, wodurch neun relevante Studien identifiziert werden konnten. Die vorliegende geringe und kurzfristige Energieverfügbarkeit in den Studien führte zu einer Abnahme des Körpergewichts, Körperfetts und der fettfreien Körpermasse (FFM). Zusätzlich wurden teilweise Abnahmen von Insulin, Leptin, insulinähnlicher Wachstumsfaktor 1 (IGF-1) und Testosteron in mehreren Studien beobachtet. Dahingegen konnte nur in jeweils einer Studie eine Zunahme von Cortisol, Carboxyterminale Kollagen-Crosslinks (CTX) und Sclerostin und eine Abnahme von Prokollagen-Typ-1-N-terminales Propeptid (PINP) und luteinisierendes Hormon (LH) festgestellt werden, während zu Trijodthyronin (T3) überhaupt keine signifikanten Ergebnisse vorlagen. Die kurzen Interventionslängen (drei bis sieben Tage) und die geringen Stichprobengrößen (maximal 60 Teilnehmer) erklären zum Teil die Heterogenität der Ergebnisse. Die männliche Physiologie scheint robuster gegenüber einer geringen Energieverfügbarkeit zu sein als die weibliche (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Es kann demnach nicht abschließend behauptet werden, dass eine geringe Energieverfügbarkeit mit einer Beeinträchtigung der Knochengesundheit, der Fortpflanzungsfunktion und des endokrinen Systems einhergeht.

Abstract

The Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) is a syndrome that affects many physiological functions as a result of low energy availability (Mountjoy, et al., 2014). The syndrome has formerly only been associated with women, but men can also be affected by a relative energy deficit (Mountjoy, et al., 2014). This systematic literature review aims to present, compare and discuss the impact of low energy availability (< 30 kcal/kg FFM/day) on certain health parameters of endocrine function, bone health and reproductive function in male athletes. To answer the research question, the databases PubMed.gov, Google Scholar and ScienceDirect were consulted, resulting in the identification of nine relevant studies. The present low and short-term energy availability in the studies led to a decrease in body weight, body fat and fat free mass (FFM). Additionally, partial decreases in insulin, leptin, insulin-like growth hormone 1 (IGF-1) and testosterone were observed in several studies. However, increases in cortisol, carboxyterminal collagen-crosslinks (CTX) and sclerostin and decreases in total N-terminal propeptide of type 1 procollagen (PINP) and luteinizing hormone (LH) were observed in only one study each, while no significant results were found for triiodothyronine (T3). The short intervention lengths and the small sample sizes partly explain the heterogeneity of the results. Male physiology seems to be more robust to low energy availability than female physiology (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Therefore, it cannot be conclusively stated that low energy availability is associated with impaired bone health, reproductive function and the endocrine system.

1. Theoretischer Hintergrund

Das International Olympic Committee (IOC) veröffentlichte 2005 eine Konsenserklärung, in der die Triade der Athletinnen vorgestellt wurde (Mountjoy, et al., 2014), die auch als Female Athlete Triad bekannt ist. Erstmals thematisiert wurde diese vom American College of Sports Medicine im Jahr 1997 (Otis, Drinkwater, Johnson, Loucks, & Wilmore, 1997). Das IOC definierte die Female Athlete Triad als eine Kombination von Essstörungen und unregelmäßigen Menstruationszyklen, was zu einer Abnahme von endogenem Östrogen und anderen Hormonen und schließlich zu einer niedrigen Knochenmineraldichte führt (Mountjoy, et al., 2014). Der Schweregrad kann von leichten über mittelschweren Gesundheitsproblemen bis hin zu schweren klinischen Folgen wie Amenorrhoe und Osteoporose führen (De Souza, Koltun, & Williams, 2019). Aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse wurde der Begriff im Jahr 2007 vom American College of Sports Medicine neu definiert (Mountjoy, et al., 2014). Die Triade wurde daraufhin als Beziehung zwischen drei miteinander verbundenen Komponenten bezeichnet. Die Energieverfügbarkeit, die Menstruationsfunktion und die Knochengesundheit (Mountjoy, et al., 2014). Die Female Athlete Triad ist weiterhin Gegenstand aktueller Forschung, wodurch sich das Verständnis für dieses Phänomen laufend verbessert (De Souza, Koltun, & Williams, 2019).

Mittlerweile ist bekannt, dass sich die Triade nicht nur aus den drei Komponenten Energieverfügbarkeit, Menstruationsfunktion und Knochengesundheit zusammensetzt, sondern, dass es sich um ein Syndrom handelt, welches aus einem relativen Energiemangel resultiert und sich auf viele physiologische Funktionen auswirkt (Mountjoy, et al., 2014). Es wurde im Laufe der Zeit deutlich, dass nicht nur Frauen von einem relativen Energiemangel betroffen sein können, sondern auch Männer (Mountjoy, et al., 2014). Daraufhin benötigte es eine neue Terminologie, um das Syndrom zu beschreiben. Im Jahr 2014 führte das IOC den neuen Begriff Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S) ein, der alle Geschlechter einschließt (Mountjoy, et al., 2014). Laut dem IOC bezieht sich das RED-S Syndrom auf eine Beeinträchtigung der physiologischen Funktionen. Diese Beeinträchtigungen entstehen durch einen relativen Energiemangel und wirken sich unter anderem auf die Stoffwechselrate, Menstruationsfunktion, Knochengesundheit, Immunität, Proteinbiosynthese und die kardiovaskuläre Gesundheit aus (Mountjoy, et al., 2014). Eine Auswahl dieser Beeinträchtigungen wird im Laufe dieser Arbeit näher betrachtet. Da der Begriff „Gesundheit“ sehr breit aufgestellt ist, wurde sich in dieser Arbeit auf einige Parameter fokussiert, die Anhand der gegebenen Literatur ausgewählt wurden, um ein bestmögliches Bild wiederzugeben.

1.1 Zielsetzung

In der Literatur werden die gesundheitlichen Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit hauptsächlich bei Athletinnen thematisiert, da bei Frauen durch das Ausbleiben der Menstruation schneller auf gesundheitliche Probleme geschlossen werden kann (Lane, et al., 2021). Jedoch kann eine niedrige Energieverfügbarkeit auch bei männlichen Athleten zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen (Mountjoy, et al., 2014). Auch bei Männern ist eine geringe Energieverfügbarkeit besonders in Sportarten prävalent, in denen auf Schlankheit und/oder Gewicht geachtet werden muss, um wettbewerbsfähig zu bleiben (Mountjoy, et al., 2014). Das betrifft u.a. Sportarten wie Radfahren, Laufen, Kampfsportarten, Berufs-Rennreiten und Rudern (Mountjoy, et al., 2018). Die Identifikation eines relativen Energiedefizits bei Athlet*innen, gilt als schwierig, da eine ausgeglichene Energiebilanz und ein stabiles Körpergewicht trotz relativen Energiedefizits vorliegen können (Carlsohn, 2020). Generell ist die Erfassung einer niedrigen Energieverfügbarkeit anfällig für Fehler und zudem sehr aufwendig (Carlsohn, 2020).

Obwohl RED-S bei weiblichen und männlichen Athlet*innen vorkommen kann, gibt es Unterschiede in der Diagnose und Auswirkung einer niedrigen Energieverfügbarkeit auf den Körper (Mountjoy, et al., 2018). Bei Frauen hat sich gezeigt, dass man bei unter 30 kcal/kg FFM/Tag von einer niedrigen Energieverfügbarkeit spricht, die sich bereits bei kurzen Perioden, negativ auf diverse Körpersysteme auswirkt (Mountjoy, et al., 2018). Bei Männern ist ein solcher Wert noch nicht bekannt (Mountjoy, et al., 2018). Die genauen Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit sind noch nicht eingehend erforscht (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).

Für diese Arbeit erschließt sich demnach folgende Frage: Welche Auswirkungen hat eine geringe Energieverfügbarkeit auf ausgewählte Parameter der Gesundheit bei männlichen Athleten? Das Ziel ist es, eine Übersicht der aktuellen Forschungsergebnisse über die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit bei männlichen Athleten anhand einer systematischen Literaturrecherche zu erstellen und diese zu bewerten.

1.2 Energiebedarf und Energieverbrauch

Der Körper benötigt Energie zur Unterstützung und Aufrechterhaltung der Körperfunktionen (Mountjoy, et al., 2014). Diese Energie wird dem Körper über Nahrung und Getränke zugeführt, um im besten Fall den Bedarf an Energie zu decken und die Gesundheit und Leistungsfähigkeit zu fördern (Braun, et al., 2019). Der tägliche Energiebedarf entspricht somit den Verbrauch an Energie pro Tag (Braun, et al., 2019). Dieser ist von vielen Faktoren abhängig, wie dem Körpergewicht, der körperlichen Aktivität, dem Wachstum, der Körperzusammensetzung und Schwangerschaft (Braun,

et al., 2019). Zur Messung des Energiebedarfs wird meist die indirekte Kalorimetrie verwendet (Braun, et al., 2019). Bei der indirekten Kalorimetrie wird anhand von Spirometrie die Sauerstoffaufnahme (VO_2) und die Kohlendioxidabgabe (VCO_2) in Liter pro Minute gemessen und berechnet (Braun, et al., 2019). Dafür wird die Formel nach Weir benutzt:

$$\text{Energie (kcal/min)} = 3,9 \times \text{VO}_2 \text{ (L/min)} + 1,1 \times \text{VCO}_2 \text{ (L/min)} \text{ (Braun, et al., 2019).}$$

Die Methode der indirekten Kalorimetrie eignet sich vor allem zur Ermittlung der Ruhestoffwechselrate (Resting metabolic rate, RMR), aber auch des Grundumsatzes und des Gesamtenergieverbrauchs (Braun, et al., 2019). Da das Verfahren der indirekten Kalorimetrie sehr aufwendig ist, wird bei Athlet*innen meist die Berechnung nach Cunningham gewählt, da diese die fettfreie Körpermasse (FFM) berücksichtigt, die bei Sportler*innen meist höher ist als bei Nichtsportler*innen (Braun, et al., 2019):

$$\text{RMR [kcal/Tag]} = 500 + 22 \times \text{LBM (Lean Body Mass = fettfreie Masse)} \text{ (Braun, et al., 2019)}$$

Um den Gesamtenergieverbrauch berechnen zu können, hat das Compendium of Physical Activities das Metabolischen Äquivalent (MET) entwickelt (Braun, et al., 2019). „Ein MET entspricht dem Energieverbrauch in Ruhe und ist definiert als 1 kcal pro kg Körpergewicht pro Stunde (kcal/kg KG/Std.)“ (Braun, et al., 2019). Das bedeutet, dass es für zahlreiche Alltagsaktivitäten und sportliche Aktivitäten MET-Werte gibt, anhand derer sich der Energieverbrauch berechnen lässt (Braun, et al., 2019). Die MET-Werte sind vergleichbar mit dem Physical Activity Level (PAL-Wert), „definiert als das Verhältnis von Gesamtenergieverbrauch zu Ruheenergieverbrauch [...] innerhalb von 24 Stunden.“ (Braun, et al., 2019). Der MET-Wert zusammen mit dem Ruheumsatz ergibt den Gesamtenergieumsatz und somit auch den Gesamtenergiebedarf. Die Ergebnisse zum Ruheenergieverbrauch und MET-Werte sollten immer mit dem Wissen betrachtet werden, dass diese aufgrund mehrerer Faktoren, u.a. den anthropometrischen Daten, nicht immer einheitlich sind und es zu Abweichungen kommen kann (Braun, et al., 2019).

1.3 Energieverfügbarkeit

Die Energieverfügbarkeit beschreibt die Energie, die dem Körper zur Verfügung steht, nachdem von der Energiezufuhr, der Energieverbrauch beim Training (Exercise Energy Expenditure, EEE) im Verhältnis zur fettfreien Masse (FFM), abgezogen wird (Mountjoy, et al., 2014):

$$\text{Energieverfügbarkeit} = \text{Energiezufuhr} - \text{Energieverbrauch im Training} \text{ (Braun, et al., 2019)}$$

Bei gesunden Erwachsenen entspricht das einem Wert von 45 kcal/kg FFM/Tag (Mountjoy, et al., 2014). Das Konzept der Energieverfügbarkeit ist hier vereinfacht dargestellt. Der Energieaufwand wird normalerweise in mehrere Bestandteile gegliedert: Ruhestoffwechselrate (resting metabolic rate, RMR), sportunabhängige Aktivitätsthermogenese (Non-Exercise Activity Thermogenesis, NEAT) und nahrungsinduzierte Thermogenese (Dietary-Induced Thermogenesis, DIT) (Abbildung 1) (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).

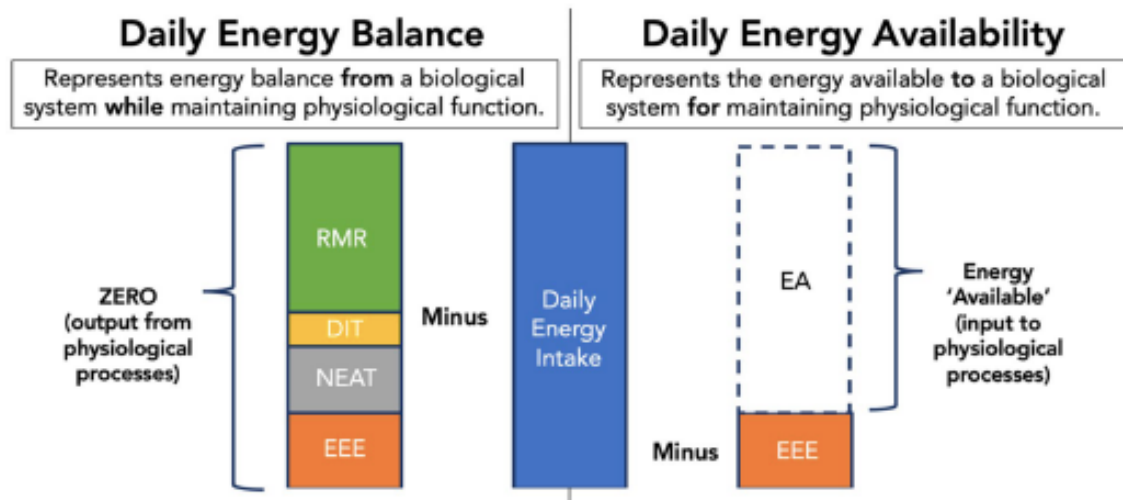


Abbildung 1: Zusammensetzung der täglichen Energiebilanz und Energieverfügbarkeit (Areta, Taylor, & Koehler, 2021)

DIT Dietary-Induced Thermogenesis (nahrungsinduzierte Thermogenese), *EA* Energy Availability (Energieverfügbarkeit), *EEE* Exercise Energy Expenditure (Energieverbrauch im Training), *NEAT* Non-Exercise Activity Thermogenesis (sportunabhängige Aktivitätsthermogenese), *RMR* Resting metabolic rate (Ruhestoffwechselrate)

Eine verminderte Energiezufuhr sowie eine erhöhte körperliche Aktivität kann zu einer reduzierten Energieverfügbarkeit führen, was negative Auswirkungen mit sich bringen kann (Braun, et al., 2019). Durch eine reduzierte Energieverfügbarkeit im Sport, kann zusätzlich zu Zyklusstörungen und verringerter Knochendichte, ein erhöhtes Risiko für metabolische, hämatologische, psychologische, kardiovaskuläre, gastrointestinale und immunologische Schäden, bestehen (Abbildung 2) (Mountjoy, et al., 2014).

Weitere Ursachen für eine unzureichende Energieverfügbarkeit können auch ein gestörtes Essverhalten, Diäten zur schnellen Gewichtsreduktion und/oder die schlechte Einschätzung des Bedarfs in Kombination mit einem extremen Trainingsprogramm sein (Mountjoy, et al., 2014). Auch ein beschränkter Zugang zu Nahrungsmitteln und fehlende Ressourcen können zu einer niedrigen Energieverfügbarkeit führen (Mountjoy, et al., 2018). Betroffen von einer geringen Energieverfügbarkeit, sind zum einen Sportler*innen, die aufgrund ihrer Sportart, auf ein niedriges Körpergewicht achten und/oder dem Druck unterliegen ein niedriges Gewicht halten zu müssen (Braun, et al., 2019). Jedoch

betrifft es auch Athlet*innen, die aus zeitlichen Gründen nicht auf ihre Nahrungszufuhr achten oder ihren Energiebedarf unterschätzen (Braun, et al., 2019).

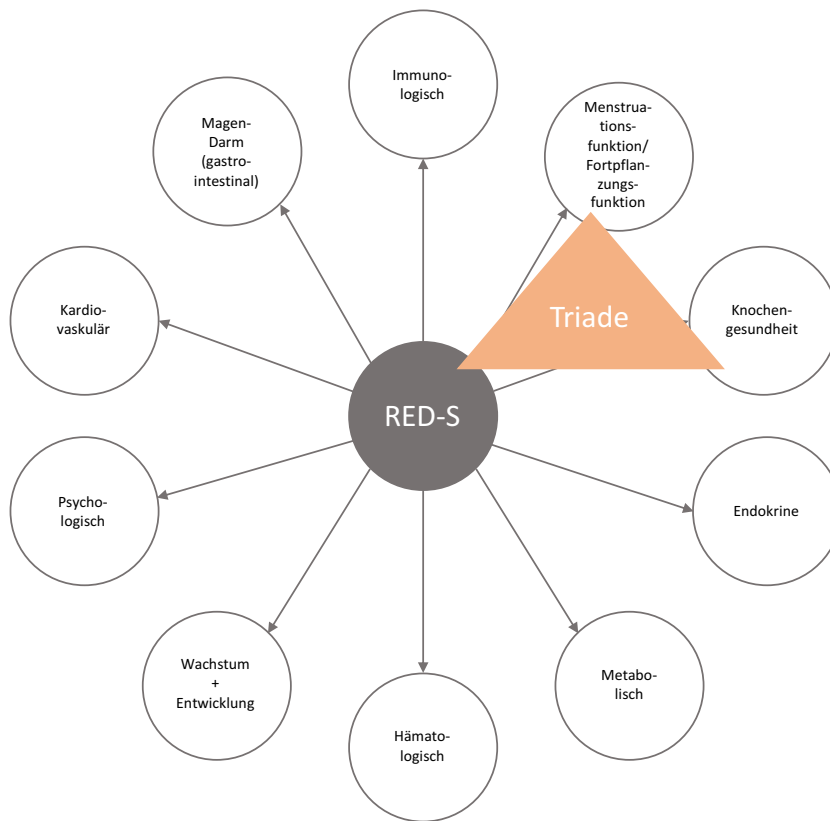


Abbildung 2: Gesundheitliche Folgen von einem relativen Energiedefizit im Sport (RED-S). Eigene Darstellung, modifiziert nach: Mountjoy, et al., 2018

Doch nicht nur die körperliche Gesundheit der Sportler*innen leidet unter einer geringen Energieverfügbarkeit (Mountjoy, et al., 2018). Auch die Leistung und mentale Gesundheit wird beeinträchtigt (Mountjoy, et al., 2018). Durch das RED-S Syndrom kann es zu Depressionen, erhöhtem Frakturrisiko und Reizbarkeit kommen, sowie auch zu verringerter Muskelkraft, Ausdauerleistung, geringeren Glykogenspeichern sowie einer verminderten Koordination und Konzentration (Abbildung 3) (Mountjoy, et al., 2018).

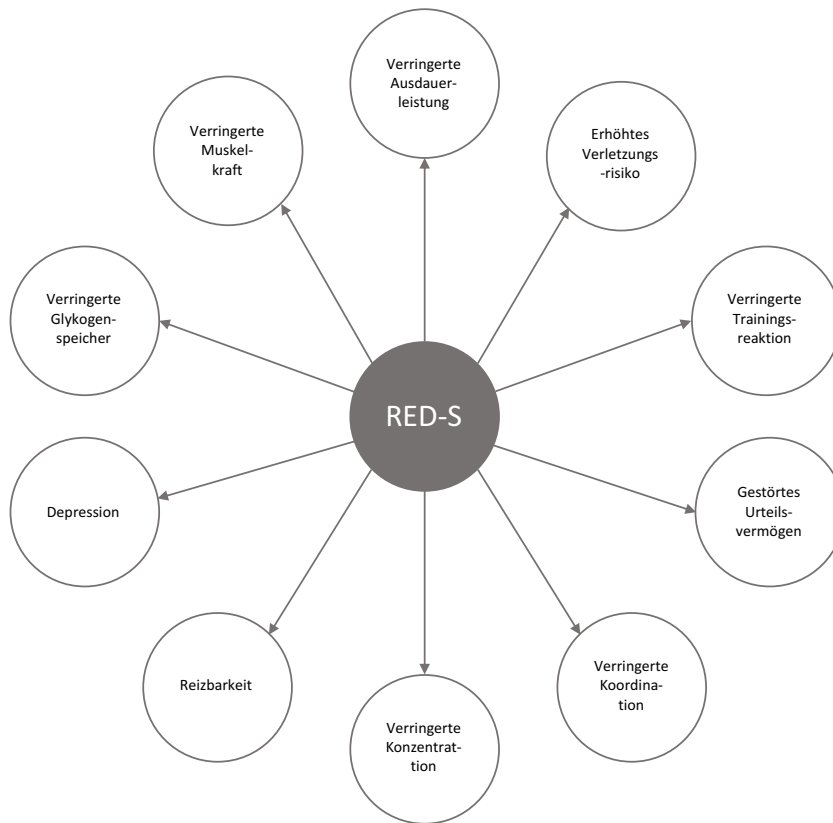


Abbildung 3: Potenzielle Leistungseffekte von einem relativen Energiedefizit im Sport (RED-S).
Eigene Darstellung, modifiziert nach: Mountjoy, et al., 2018

1.4 Endokrine Funktionen

Vor allem bei weiblichen Athletinnen wurden in der Vergangenheit die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf das endokrine System untersucht (Mountjoy, et al., 2018). Dabei wurden Störungen der Hypothalamus-Hypophyse-Nebennierenrinde-Achse und Hypothalamus-Hypophyse-Schilddrüsen-Achse beobachtet (Mountjoy, et al., 2018). Außerdem traten Veränderungen in der Konzentration von Stoffwechselformonen auf (Mountjoy, et al., 2018). Es gibt Hinweise, dass bei männlichen Athleten ähnliche Auswirkungen aufgrund einer niedrigen Energieverfügbarkeit auftreten können (Logue, et al., 2020). Das von Adipozyten (Fettzellen) synthetisierte Stoffwechselformon Leptin, spielt eine wichtige Rolle in der Energiehomöostase, da es unter anderem den Energieverbrauch und die Energieaufnahme reguliert (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Es wirkt in Teilen des Hypothalamus und hemmt das Hungergefühl (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).

Beim Hypothalamus handelt es sich um eine Hirnregion, die Informationen aus dem Körper, der Umwelt und dem zentralen Nervensystem verarbeitet und steuert (Heger, 2010, S. 312). Er wird als Steuerungszentrum betrachtet, indem viele Prozesse wie die Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme,

Stressantwort, Sexual- und Fortpflanzungsfunktion sowie das Wachstum reguliert werden (Heger, 2010, S. 312). Der Hypothalamus ist mit der Hypophyse über eine Gewebestruktur, dem Infundibulum, verbunden und steuert diese durch die Freisetzung von Hormonen im Hypophysenvorderlappen oder Nervenimpulsen im Hypophysenhinterlappen (Köhrle, Schomburg, & Schweizer, 2014, S. 483). Diese wiederum bilden weitere Hormone zur Steuerung unterschiedlichster Zielorgane oder -gewebe (Heger, 2010, S. 312). In Abbildung 4 sind die Hormone und Zielorgane aufgezeigt, die für diese Arbeit relevant sind.

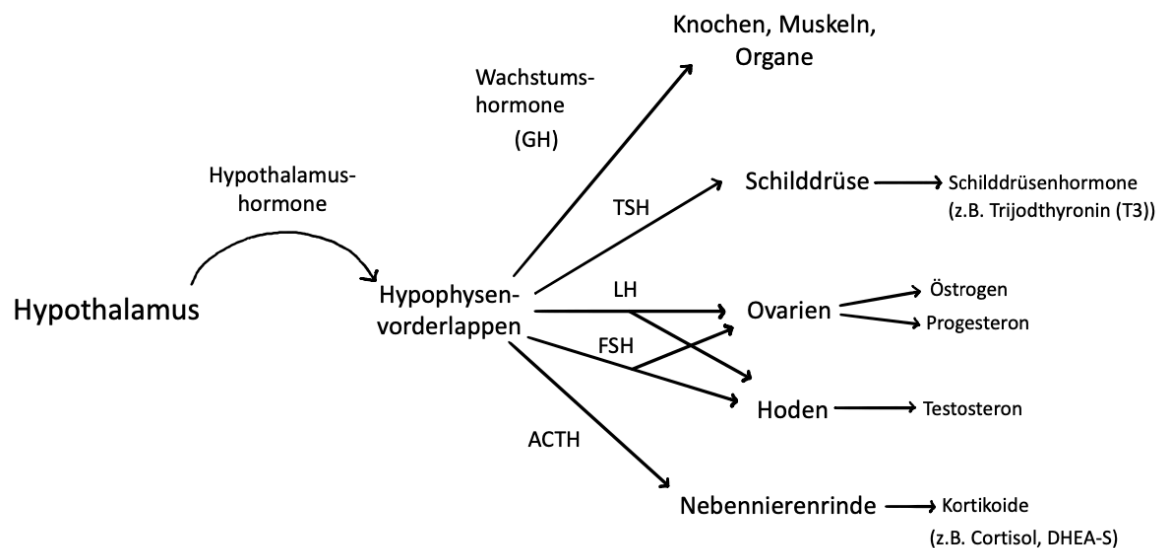


Abbildung 4: Teil der Hypothalamus-Hypophyse. Eigene Darstellung, modifiziert nach: Arafat, 2016 (S. 401-e2)

TSH Thyreotropin, *LH* Luteinisierendes Hormon, *FSH* Follikelstimulierendes Hormon, *ACTH* Adrenocorticotropin, *DHEA-S* Dehydroepiandrosteron-Sulfat

Die Hypothalamus-Hypophysen-Schilddrüsen-Achse ist an der Regulierung der adaptiven Thermogenese und des Energieverbrauchst beteiligt (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Schilddrüsenhormone, zu denen unter anderem das Trijodthyronin (T3) gehört, spielen eine Rolle bei metabolischen Stoffwechselwegen im Zusammenhang mit dem Energiehaushalt (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Die Ausschüttung von Thyreotropin (TSH), regt in der Schilddrüse die Sekretion von Schilddrüsenhormonen an. Bereits 1993 beobachteten Loucks und Callister einen niedrigen T3-Wert bei amenorrhöischen Sportlerinnen, weshalb vermutet wurde, dass T3 auf die Energieverfügbarkeit reagierte (Loucks & Callister, 1993).

Zudem wurde eine weitere Gruppe von Hormonen beobachtet, die auf eine geringe Energieverfügbarkeit reagieren (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Die Hypophyse produziert das Wachstumshormon (Growth Hormone, GH), welches die Leber zur Produktion der insulinähnlichen Wachstumsfaktoren 1 (Insulin-like growth factor-1, IGF-1) anregt (Murphy & Koehler, 2020). Dieses Hormon

ist für das Wachstum verschiedener Zellen verantwortlich und hat unter anderem Einfluss auf die Knochenbildung (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).

Insulin zeigt ebenfalls eine Reaktion auf eine geringe Energieverfügbarkeit (Elliott-Sale, Tenforde, Parziale, Holtzman, & Ackerman, 2018). Das Hormon reguliert die Aufnahme von Energie. Eine reduzierte Nahrungsaufnahme führt zu einer gesenkten Insulinkonzentration, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass auch beim Vorliegen einer niedrigen Energieverfügbarkeit die Insulinkonzentration sinkt (Elliott-Sale, Tenforde, Parziale, Holtzman, & Ackerman, 2018).

Anders als IGF-1 hat das Stresshormon Cortisol eine katabole Wirkung (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Es wird von der Nebennierenrinde produziert und hemmt die Ausschüttung des adrenokortikotropen Hormons (ACTH) aus dem Hypophysenvorderlappen (Arafat, 2016, S. 401-e2). Es wurden bereits Hinweise geliefert, dass sich der Cortisolspiegel durch eine geringe Energieverfügbarkeit verändert (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Ob ein lediglich durch eine eingeschränkte Nahrungszufuhr ausgelöstes Energiedefizit für eine Erhöhung des Cortisolspiegels ausreicht, oder ob ebenfalls eine erhöhte körperliche Aktivität vorliegen muss, ist nach derzeitigem Forschungsstand noch ungeklärt (Areta, Taylor, & Koehler, 2021)

1.5 Knochengesundheit

Wie bereits erwähnt ist IGF-1 und GH wichtig bei der Entwicklung des Skelettsystems und eine Abnahme von IGF-1 ist mit Knochenverlust verbunden (Murphy & Koehler, 2020). Durch eine negative Rückkopplung, führt IGF-1 zu einer verringerten Freisetzung von GH (Murphy & Koehler, 2020). Es ist bekannt, dass bei einer Hungersnot, die Leber unempfindlicher auf GH reagiert, was dazu führt, dass sich das Gleichgewicht zwischen GH und IGF-1 zugunsten GH verschiebt (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Durch das Vorliegen einer geringen Energieverfügbarkeit, ist das Energiegleichgewicht gestört und es kommt zu einem höheren Vorkommen an GH während gleichzeitig IGF-1 reduziert wird. Dadurch kann es zu Störungen in der Entwicklung und im Zellwachstum kommen (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).

Für Sportler*innen ist das Skelettsystem und seine Gesundheit von großer Bedeutung (Goolsby & Boniquit, 2017). Der Knochenumbau läuft etappenweise durch kontinuierliche Knochenresorption und -bildung (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Die Knochenmineraldichte (oder Knochenmasse) unterliegt einer stetigen Entwicklung und die Beeinträchtigung der Knochengesundheit kann bereits in der Gebärmutter beginnen (Goolsby & Boniquit, 2017). Die maximale Knochenmineraldichte wird im jungen Erwachsenenalter erreicht (Sale & Elliott-Sale, 2019). Bei Frauen wird der Höhepunkt früher erreicht als bei Männern (Mountjoy, et al., 2014). Danach nimmt diese ab, was

hauptsächlich auf genetische Faktoren zurückzuführen ist (Goolsby & Boniquit, 2017). Dabei haben Sportler*innen eine höhere Knochendichte (ca. 10 %) als Nicht-Sportler*innen (Goolsby & Boniquit, 2017). Durch das weibliche Geschlechtshormon Östrogen, wird die Aufnahme von Kalzium und Ablagerung in den Knochen unterstützt (Mountjoy, et al., 2014). Diese nimmt im Laufe des Alters ab, weshalb Frauen anfälliger für die Entwicklung von Osteoporose (Knochenschwund) sind als Männer (Sale & Elliott-Sale, 2019). Auch Lebensstilfaktoren, wie die Ernährung, Kalziumzufuhr, körperliche Aktivität, Rauchen und Alkoholkonsum, haben eine Auswirkungen auf die Knochengesundheit (Goolsby & Boniquit, 2017). In dem Lebensabschnitt, indem die höchste Knochenmineraldichte vorliegt, ist jedoch das Risiko für eine unausgewogene Ernährung, inklusive eine unzureichenden Kalziumzufuhr, bis hin zur Essstörung am höchsten (Goolsby & Boniquit, 2017). Ein erhöhtes Risiko für Stressfrakturen kann durch eine veränderte Knochenstruktur aufgrund von unausgewogener Ernährung aber auch exzessivem Training, niedrigem Body-Mass-Index oder früheren Verletzungen auftreten (Mountjoy, et al., 2014). Diese Risikofaktoren treten ebenfalls häufiger bei RED-S Patient*innen auf (Mountjoy, et al., 2014)

Eine niedrige Knochenmineraldichte wird meistens mit der Dual Energy X-Ray Absorptiometrie (DXA, Doppellröntgenabsorptiometrie) gemessen (Goolsby & Boniquit, 2017). Die Ergebnisse zur Knochendichte werden anhand des T-Score oder Z-Score angegeben (Goolsby & Boniquit, 2017). Der T-Score wird angegeben als die Standardabweichung (SD) der Knochendichte junger Erwachsener (Goolsby & Boniquit, 2017). Der Z-Score, gibt die durchschnittliche Knochenmasse an und vergleicht diese mit der Knochenmasse von Personen im selben Alter und Geschlecht (Sale & Elliott-Sale, 2019). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) unterteilt den T-Score in vier Kategorien (Tabelle 1) (Roth, et al., 2000).

Tabelle 1: Definitionen der unterschiedlichen Knochendichten laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Eigene Darstellung, modifiziert nach: Roth, et al., 2000

Beurteilung	Knochendichte (T-Score)
Normal	< 1 SD Unterhalb des Durchschnittswertes junger Erwachsener
Osteopenie	1 – 2.5 SD Unterhalb des Durchschnittswertes junger Erwachsener
Osteoporose	> 2.5 SD Unterhalb des Durchschnittswertes junger Erwachsener
Schwere Osteoporose	> 2.5 SD Unterhalb des Durchschnittswertes junger Erwachsener und eine oder mehrere Stressfrakturen

Bei Osteoporose handelt es sich laut der WHO um eine Erkrankung des Skelettsystems, charakterisiert durch eine Verringerung der Knochenmasse und Knochenarchitektur (World Health Organization, 1994). An Osteoporose erkrankte Menschen, haben ein erhöhtes Risiko für Frakturen (Sale & Elliott-Sale, 2019). Diese Erkrankungen kann Sportler*innen stark in ihrer Leistung und Gesundheit beeinträchtigen und das Osteoporoserisiko sollte, soweit es geht, durch Prävention minimiert werden (Sale & Elliott-Sale, 2019). Körperliche Aktivität wirkt sich positiv auf den Knochenstoffwechsel und das Osteoporoserisiko aus. Es ist daher ratsam, ein ganzes Leben lang aktiv zu sein und zu bleiben (Sale & Elliott-Sale, 2019). Athlet*innen, die Ausdauersportarten wie Langstreckenlauf, Schwimmen und Radfahren ausüben haben eine geringere Knochenmineraldichte als Athlet*innen in den Sportarten Fußball, Hockey, Kampfsportarten und Kraftsportarten (Sale & Elliott-Sale, 2019).

Um Veränderungen der Knochenmineraldichte mit bildgebenden Verfahren nachzuweisen, sind meist Monate oder Jahre erforderlich (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Um kurzfristige Perioden einer geringen Energieverfügbarkeit und ihre Auswirkungen auf die Knochengesundheit zu untersuchen, werden Veränderungen von Serummarkern betrachtet. Dazu gehören z.B. das Carboxyterminale Kollagen-Crosslinks (CTX oder β -CTX), das Prokollagen-Typ-1-N-terminales Propeptid (P1NP) (Obermayer-Pietsch & Schwetz, 2016) oder das Sclerostin (Murphy & Koehler, 2020). Eine

erhöhte Knochenresorption geht mit einem erhöhten CTX-Spiegel einher, während ein verminderter CTX-Spiegel einen verminderten Knochenumsatz anzeigt (Obermayer-Pietsch & Schwetz, 2016). Serumprokollagene, wie P1NP sind Marker des Knochenaufbaus und für die Diagnostik eines erhöhten Knochenstoffwechsels geeignet (Obermayer-Pietsch & Schwetz, 2016).

Über die Beziehung zwischen einer niedrigen Knochenmineraldichte und geringer Energieverfügbarkeit bei männlichen Athleten gibt es zurzeit wenige Studien (Elliott-Sale, Tenforde, Parziale, Holtzman, & Ackerman, 2018). Es wurde allerdings festgestellt, dass eine geringe Knochenmasse bei männlichen Sportlern mit geringen Testosteronwerten einhergehen (Mountjoy, et al., 2014). Es ist also anzunehmen, dass die Knochenmasse Auswirkungen auf endokrine Funktionen sowie die Fortpflanzung hat.

1.6 Fortpflanzungsfunktion

Durch eine geringe Energieverfügbarkeit wird die Fortpflanzungsfunktion bei Frauen negativ beeinflusst (Logue, et al., 2020). Wie in Abbildung 5 zu sehen, wird im Hypothalamus das Gonadotropin Releasing Hormon (GnRH) ausgeschüttet, was dazu führt, dass im vorderen Hypophysenlappen, das luteinisierende Hormon (LH) und follikelstimulierende Hormon (FSH) ausgeschüttet wird. LH und FSH stimulieren daraufhin die Produktion von Östrogen und Progesteron in den Eierstöcken (Logue, et al., 2020). Dadurch kommt es zu einer negativen Rückkopplung, woraufhin die Ausschüttung von GnRH, LH und FSH reduziert wird (Logue, et al., 2020). Nach Hackney, et al. (1997), gibt es Hinweise darauf, dass beim männlichen Geschlecht ebenfalls eine Beeinträchtigung der Fortpflanzungsfunktion durch eine niedrige Energieverfügbarkeit über ein hohes Trainingsausmaß entstehen kann, bekannt als „exercise hypogonadal male condition“ (EHMC) (Hackney, Fahrner, & Stupnicki, 1997). Dabei wird vermutet, dass durch LH und FSH die Testosteronproduktion in den Hoden aktiviert wird (Abbildung 5) (Logue, et al., 2020). Die Zusammenhänge sind noch nicht hinreichend erforscht worden, weshalb bzgl. der Störung in der Hypothalamus-Hypophysen-Gonadal-Achse bei männlichen Athleten noch keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können (Logue, et al., 2020). Bekannt ist, dass Testosteron eine anabole Wirkung auf die Knochen hat, indem es die Knochenbildung und Kalziumaufnahme fördert (Mountjoy, et al., 2014).

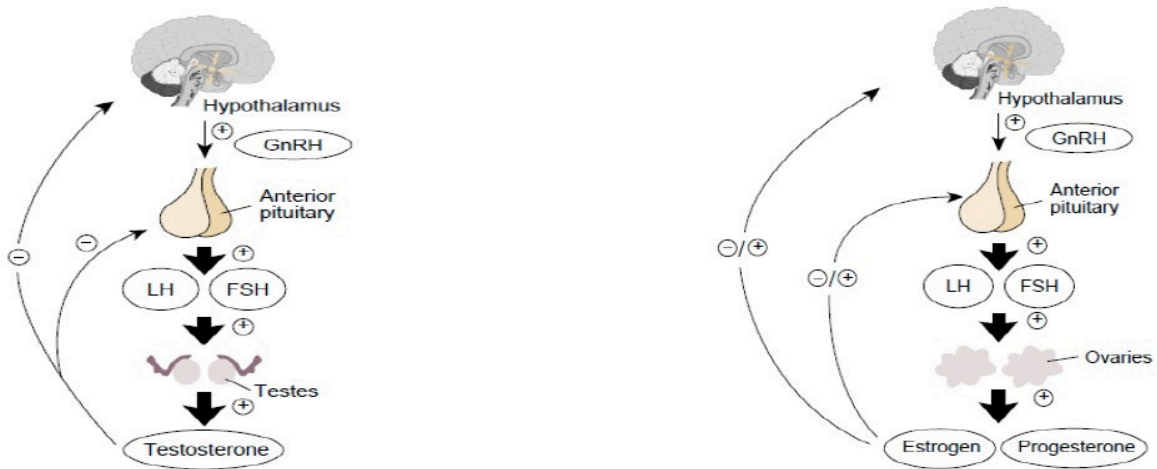


Abbildung 5: Hypothalamus-Hypophyse-Gonadal-Achse (Logue, et al., 2020)

Männer: Links; Frauen: Rechts. *GnRH* Gonadotropin Releasing Hormone, *LH* Luteinisierendes Hormon, *FSH* Follikelstimulierendes Hormon.

2. Methode

In dieser Arbeit wird eine systematische Literaturrecherche eingesetzt, um die Forschungsfrage nach den Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit bei männlichen Sportlern zu beantworten. Die Methode wurde ausgewählt, da für ein experimentelles Design nicht die Kenntnisse sowie Ressourcen vorliegen. Eine systematische Literaturrecherche hat sich bei diesem Thema gut angeboten, da es sich um einen neuen noch nicht weit erforschten Bereich handelt. Somit kann am besten ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand gegeben werden. Für die Recherche wurden die Datenbanken PubMed.gov und Google Scholar herangezogen, um wissenschaftlichen Arbeiten und Studien auszumachen. Dabei wurden diese themenspezifischen Stichworte gewählt, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen: „red-s men“, „female athlete triad“, „low energy availability AND bone health“, „men athlete triad“. Die genauen Stichwörter und die dazugehörigen Suchergebnisse sind in einem Flow Chart (Anhang I) sowie in Tabelle 2 dargestellt. Die letzte Suchabfrage wurde am 02.01.2023 getätigt. Um eine möglichst verlässliche Datenlage zu erreichen, wurden in der Recherche vor allem systematische Reviews, Metaanalysen sowie randomisierte, kontrollierte Studien (randomized controlled trial, RCT) eingeschlossen. Bei RCT-Studien kann durch das Vorliegen einer Kontrollgruppe und die Randomisierung der Teilnehmer*innen besser Vergleiche gezogen werden als in anderen Studiendesigns (Held, 2010). Systematische Reviews sowie Metaanalysen fassen Primärstudien zusammen und bieten eine gute Informationsgrundlage über das Thema an (Held, 2010).

In der Datenbank PubMed.gov wurde die Suche zusätzlich auf die Zeitspanne 2010 – 2022 beschränkt und nur nach frei verfügbaren Texten gesucht. Aufgrund der geringen Ergebnisse nach dieser Einschränkung, wurde der Filter für RCT-Studien wieder entfernt. Bei Google Scholar wurde ebenfalls die gleiche Zeitspanne angegeben. Dort war es jedoch nicht möglich nach frei verfügbaren Texten zu suchen, weshalb die Anzahl der Suchergebnisse um einiges höher ausfiel. Die 12-Jahrespanne wurde zum einen gewählt, da es zum „Relative Energy Deficiency in Sport“ bezüglich männlicher Athleten nur wenige Studien gibt und so vermieden wurde wichtige Literatur auszuschließen. Zum anderen ist seit 2014 mit der Begriffsänderung durch das IOC auch das Interesse an RED-S bei Männern gestiegen, weshalb ab dem Zeitpunkt mehr Studien durchgeführt wurden. Im nächsten Schritt wurden irrelevante Quellen aus Basis ihrer Abstracts ausgeschlossen. Die Datenbank PubMed.gov wurde bei der systematischen Literaturrecherche als erstes gewählt. Google Scholar diente während der Recherche aufgrund von Dopplungen hauptsächlich der Unterstützung. Auch die Datenbank ScienceDirect wurde verwendet, lieferte aber keine neuen Ergebnisse. Vor allem bei Frauen ist RED-S schon besser erforscht, weshalb bzgl. des männlichen Geschlechts nur eine begrenzte Anzahl an Quellen gefunden werden konnte. Auch Filtereingrenzungen wie die Suche nach frei verfügbaren Texten, schränkt das Suchergebnis ein.

Durch die eingeschlossenen Studien und wissenschaftlichen Arbeiten wurde mittels Literaturverzeichnis der Quellen weitere, relevante Literatur identifiziert. Diese wurde anhand von Stichworten wie: „Murphy AND Koehler“, „Food restriction AND Degoutte“, „Low energy availability AND Kojima“ und „Rapid weight loss AND Karila“ in der Datenbank PubMed.gov gefunden und ebenfalls eingeschlossen. Die sind ebenfalls in dem Flow Chart abgebildet (Anhang I). Durch die systematische Literaturrecherche konnten neun Studien gefunden werden, welche in dieser Arbeit miteinander verglichen und diskutiert werden.

Die verwendete Methodik findet sich auch in Übersichtsarbeiten wie von Logue, et al. 2020 wieder. Dort wurde ebenfalls in drei Datenbanken anhand von Suchbegriffen nach Studien recherchiert und diese miteinander verglichen (Logue, et al., 2020). In Übersichtsarbeiten wie von Areta, et al. 2021 oder Fagerberg, et al. 2018 wurden die Ergebnisse aus Studien nach ähnlichen Themen unterteilt und in Tabellen festgehalten. Eine Flow Chart, die bei der Reproduzierbarkeit einer systematische Literaturrecherche beiträgt, konnte in anderen Arbeiten nicht gefunden werden.

Tabelle 2: Recherchevorgang - Ausgewählte Studien

Datenbank	Suchbegriffe	Filter	Anzahl der Ergebnisse	Ausgewählte Studien
PubMed.gov	Red-s men	Free full text	13	(Koehler, et al., 2016), (Lane, et al., 2021)
PubMed.gov	Red-s men	Free full text, RCT-Studie	3	(Papageorgiou, et al., 2017)
PubMed.gov	Female athlete triad	Free full text, 2010 - 2022	121	(Moore, et al., 2021)
PubMed.gov	Low energy availability AND bone health	Free full text, RCT	1	(Murphy, Bilek, & Koehler, 2021)
PubMed.gov	Murphy AND Koehler	Free full text, RCT	11	(Murphy & Koehler, 2020)
PubMed.gov	Food restriction AND Degoutte	-	3	(Degoutte, et al., 2006)
PubMed.gov	Low energy availability AND Kojima	RCT	2	(Kojima, et al., 2020)
PubMed.gov	Rapid weight loss AND Karila	-	1	(Karila, et al., 2008)

3. Ergebnisse

Mithilfe der systematischen Literaturrecherche konnten neun relevante Studien identifiziert werden, in denen eine geringe Energieverfügbarkeit bei Männern thematisiert wird. Aus systematischen Übersichtsarbeiten wurden Ergebnisse zu den Auswirkungen einer niedrigen Energieverfügbarkeit entnommen. Eine Übersicht der Ergebnisse ist zusätzlich in alphabetischer Reihenfolge in einer PICOR-Tabelle (**P**roblem-**I**ntervention-**C**ontrol-**O**utcome-**R**esults) dargestellt (Anhang II).

Es wurden Parameter zur Anthropometrie und Körperzusammensetzung, sowie endokrinen Funktion, Knochengesundheit und Fortpflanzungsfunktion beleuchtet, um ein bestmögliches Bild über mögliche Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit zu geben.

3.1 Körpergewicht und -zusammensetzung

Die Ergebnisse mehrerer Studien zeigten, dass eine eingeschränkte Energiezufuhr, wie sie im Rahmen einer RED-S vorkommt, zu Veränderungen der Anthropometrie und der Körperzusammensetzung führt. Wie genau diese Studien aufgebaut sind und welche Ergebnisse sie liefern, wird im Verlauf dieser Arbeit erörtert. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Bezug auf die Körperzusammensetzung ist in Tabelle 3 zu sehen.

Degoutte, et al. (2006) untersuchten die Auswirkungen einer eingeschränkten Energie- und Flüssigkeitszufuhr auf die Physiologie, Psychologie und körperliche Leistungsfähigkeit bei männlichen Judo-Athleten (Degoutte, et al., 2006). Hierbei handelt es sich um eine randomisierte Kontrollstudie, in der 20 Judo-Athleten in zwei Gruppen, à 10 Athleten eingeteilt wurden. Gruppe A sollte eine Woche vor dem Wettkampf ca. 5 % ihres Körpergewichts verlieren und Gruppe B sollte ihr Gewicht halten. Es wurden zu drei Zeitpunkten Tests durchgeführt: während einer längeren Phase der Gewichtserhaltung (T_1), nach einer 7-tägigen Restriktionsdiät (ca. 955 kcal Energiedefizit) am Morgen des Wettkampftages (nur Gruppe A) (T_2) und 10 Minuten nach dem Wettkampf (T_3). Die Diät durfte individuell von den Athleten durchgeführt werden und wurde anhand eines Ernährungstagebuchs geprüft. Die Athleten sollten so genau wie möglich die Zufuhr von Nahrung und Flüssigkeit dokumentieren (Degoutte, et al., 2006). Eine genaue Dokumentation sollte durch Interviews und eine Einführung zu Beginn der Diät sichergestellt werden. Zusätzlich zur Nahrungs- und Flüssigkeitszufuhr wurden anthropometrische Daten, wie Größe, Gewicht, Body-Mass-Index (BMI), fettfreie Körpermasse (FFM) und Körperfett gemessen. Auch Erhebungen zur Psyche und Leistung wurden durchgeführt und Blutproben entnommen. Durch die Restriktion von Nahrung gelang es Gruppe A signifikant 5 % ihres Körpergewichts und ihres Körperfett und fettfreier Masse zu verringern, während in Gruppe B keine signifikanten Veränderungen festgestellt wurden (Degoutte, et al., 2006).

Um die Auswirkungen einer schnellen Gewichtsreduktion bei Elite-Wrestlern herauszufinden, untersuchten Karila, et al. (2008) in einer Interventionsstudie 18 Wrestler aus unterschiedlichen Gewichtsklassen (55 – 85 kg) (Karila, et al., 2008). Die Teilnehmer hatten ein Durchschnittsalter von 21,9 Jahren und sollten über einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen eine individuelle Diät durchführen, in der eine Energiezufuhr von 800 – 2000 kcal pro Tag vorgeschrieben war. Die Höhe der Energiezufuhr hing dabei vom individuellen Energieverbrauch und der Menge des Gewichtsverlustes während der Intervention ab. In den letzten zwei Tagen der Diät, sollte durch das Schwitzen bei extremer körperlicher Belastung und Saunagängen und durch eine weitere Energiereduktion auf 500 – 1000 kcal pro Tag, ein noch stärkerer Gewichtsverlust angeregt werden. Mithilfe der Dual-Energy-X-Ray-Absorptiometrie (DXA) Messung wurde vor und nach der Diät die Körperzusammensetzung der Teilnehmer ermittelt. Anhand der DXA-Messung wurde eine signifikante Abnahme des

Körpergewichts ($5,7 \pm 1,5$ kg), der Fettmasse ($0,9 \pm 0,4$ kg), der mageren Körpermasse ($4,8 \pm 1,3$ kg) und des Körperfettanteils ($0,7 \pm 0,5$ %) festgestellt (Karila, et al., 2008).

Koehler, et al. (2016) untersuchten die endokrinen Effekte einer geringen Energieverfügbarkeit bei männlichen Sportlern (Koehler, et al., 2016). Dabei wurden sechs Sportler durch vier verschiedene Phasen geführt, in denen die Energiezufuhr und der Energieverbrauch durch Training kontrolliert wird. Es handelt sich hierbei um eine randomisierte, kontrollierte Cross-Over-Studie, in der alle Teilnehmer alle Konditionen in zufälliger Reihenfolge absolvieren. Die Konditionen einer geringen Energieverfügbarkeit (15 kcal/kg FFM/Tag) wird, genauso wie die Kontrollgruppe (C) mit einer normalen Energieverfügbarkeit (40 kcal/kg FFM/Tag), jeweils mit und einmal ohne zusätzliche sportliche Aktivität durchgeführt. Daraus resultierten vier Gruppen: (1) Geringe Energieverfügbarkeit (low energy availability, LEA), (2) Geringe Energieverfügbarkeit + Training (LEA + exercise (EX)), (3) Kontrollgruppe (C) und (4) Kontrollgruppe + Training (C + EX). Alle vier Phasen haben eine Dauer von vier Tagen. Vor Beginn der Studie und nach jeder absolvierten Kondition, wurden verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Körperzusammensetzung, Energieverfügbarkeit, Hormonen und Metaboliten durchgeführt. Das Körpergewicht sowie -zusammensetzung wurde mithilfe einer Bioelektrischen Impedanzanalyse (BIA) gemessen. In den beiden Konditionen mit einer geringen Energieverfügbarkeit (LEA, LEA + EX) konnte eine signifikante Gewichtsabnahme und Abnahme des Körperfetts festgestellt werden. Bei LEA betrug die Gewichtsabnahme $2,4 \pm 0,3$ kg und bei LEA + EX $1,8 \pm 0,4$ kg. Die fettfreie Masse (FFM) hat sich nicht signifikant verändert (Koehler, et al., 2016).

Mithilfe einer randomisierten, Cross-Over Design Studie untersuchten Kojima, et al. (2020) anhand von sieben männlichen Ausdauerläufern die Auswirkungen, die ein Ausdauertraining unter einer geringen Energieverfügbarkeit auf den Glykogengehalt der Muskeln und Marker für Muskelschäden hat (Kojima, et al., 2020). Durch eine BIA-Messung und Blutentnahmen wurden weitere Parameter der Körperzusammensetzung und endokrinen Funktion untersucht. Die sieben Ausdauersportler mussten während drei aufeinander folgenden Tagen ein Lauftraining absolvieren und zusätzlich einer vorgeschriebenen Ernährung folgen, um die entsprechende Energieverfügbarkeit zu erreichen. Das Training wurde unter zwei unterschiedlichen Konditionen durchgeführt und bestand aus 75 minütigen Läufen bei einer Geschwindigkeit von $15,2 \pm 1,2$ km/h um ca. 70 % VO_{2max} zu erreichen. Die Konditionen bestanden aus einer niedrigen Energieverfügbarkeit (15 kcal/kg FFM/Tag) und einer normalen Energieverfügbarkeit (45 kcal/kg FFM/Tag). Zwischen den beiden Testzeiträumen lag eine Pause von zwei Wochen. Das Körpergewicht, die fettfreie Masse (FFM) und Skelettmuskelmasse ist während der dreitägigen Trainingsperiode in der Gruppe mit einer geringen Energieverfügbarkeit signifikant gesunken (Kojima, et al., 2020).

Die Auswirkungen eines Widerstandstrainings auf die anabole endokrine Reaktion während einer Kalorienrestriktion untersuchten Murphy und Koehler (2020) in einer randomisierten, einseitig verblindeten Cross-Over Studie (Murphy & Koehler, 2020). Dabei wurden insgesamt sieben Teilnehmer*innen, fünf Männer und zwei Frauen, rekrutiert. Diese durchliefen in der Studie drei verschiedenen Konditionen: (1) Geringe Energieverfügbarkeit (15 kcal/kg FFM/Tag) plus eine Kohlenhydratzufuhr von 30 g nach dem Krafttraining (caloric restriction + carbohydrate, CRC), (2) geringe Energieverfügbarkeit plus Eiweißzufuhr von 30 g nach dem Training (caloric restriction + protein, CRP) und (3) eine Kontrollgruppe (CON) mit einer Energieverfügbarkeit von 40 kcal/kg FFM/Tag und Kohlenhydratzufuhr von 30 g nach dem Training. Jede Kondition hatte eine Dauer von drei Tagen, wobei am dritten Tag ein Widerstandstraining stattfand, bei denen die Proband*innen 5 Sätze je 5 Wiederholungen Kniebeugen an der Langhantel absolvierten. Vor Beginn der jeweiligen Kondition und nach Ablauf der drei Tage wurden das Körpergewicht und -zusammensetzung mithilfe der DXA-Messung bestimmt. In allen drei Konditionen verloren die Teilnehmer*innen an Gewicht. Jedoch war die Abnahme in den beiden Gruppen mit einer geringen Energieverfügbarkeit (CRC, CRP) signifikant höher als in der Kontrollgruppe. In CRC und CRP wurde außerdem eine signifikante Abnahme der Fettmasse und fettfreien Körpermasse beobachtet (Murphy & Koehler, 2020).

Ebenso untersuchten Murphy, et al. (2021) anhand einer randomisierten, kontrollierten Cross-Over-Pilotstudie die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit in Kombination mit einer geringen Proteinzufuhr, auf die Knochengesundheit und die Körperzusammensetzung (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021). Die Studie bestand, ähnlich wie bei Murphy und Koehler (2020) aus drei Konditionen mit jeweils einer Dauer von 5 Tagen. Sieben junge ($23,9 \pm 1,5$ Jahren) Männer absolvierten alle drei Konditionen: (1) Geringe Energieverfügbarkeit (15 kcal/kg FFM/Tag) und erhöhte Eiweißzufuhr (1,7 g Eiweiß/kg Körpergewicht(KG)/Tag), (2) Geringe Energieverfügbarkeit und geringe Eiweißzufuhr (0,8 g Eiweiß/kg KG/Tag) und (3) Kontrollgruppe (40 kcal/kg FFM/Tag + 1,7 g Eiweiß/kg KG/Tag). In allen drei Bedingungen sollten die Teilnehmer einen Energieverbrauch von 15 kcal/kg FFM/Tag durch das Fahrradfahren erreichen. Die Teilnehmer der Gruppen mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit verloren mehr Gewicht, Fettmasse und magere Körpermasse (fettfreie Körpermasse) als in der Kontrollgruppe (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021).

In einer weiteren randomisierten Cross-Over-Studie, untersuchten Papageorgiou, et al. (2017) ebenfalls die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf die Körperzusammensetzung sowie Knochenmarker (Papageorgiou, et al., 2017). In dieser Studie wurden Frauen und Männer berücksichtigt, um die Unterschiede zwischen den beiden Geschlechtern zu vergleichen. Insgesamt nahmen elf Frauen und elf Männer an der Studie teil und absolvierten zwei Konditionen mit einer Dauer von jeweils neun Tagen: (1) Geringe Energieverfügbarkeit (15 kcal/kg FFM/Tag) und (2) Kontrollgruppe (45 kcal/kg FFM/Tag). Zusätzlich verbrauchten die Teilnehmer*innen 15 kcal/kg FFM/Tag durch

Ausdauertrainings (Laufen). Neben Ernährungs- und Trainingsprotokollen zur Bestimmung der Energiezufuhr und des Energieverbrauchs, gehörten zu den Messungen Blutentnahmen und biochemische Analysen. Auch in dieser Studie konnte eine Abnahme des Körpergewichts in der Restriktionsgruppe beobachtet werden (Papageorgiou, et al., 2017).

Tabelle 3: Ergebnisse zum Körpergewicht und -zusammensetzung, eigene Darstellung

Studie	Population	Dauer	Energieverfügbarkeit (kcal/kg FFM/Tag)	Körpergewicht (kg)	Körperfett (kg)	FFM (kg)
(Degoutte, et al., 2006)	n = 20	7 Tage	k.A.	↓ (Gruppe A)	↓ (Gruppe A)	↓ (Gruppe A)
(Karila, et al., 2008)	n = 18	2 - 3 Wochen	k.A.	↓	↓	↓
(Koehler, et al., 2016)	n = 6	4 x 4 Tage	16 und 40	↓ GE	↓	↔
(Kojima, et al., 2020)	n = 7	2 x 3 Tage	19 und 53	↓ GE	↔	↓ GE
(Murphy & Koehler, 2020)	n = 7 (2 W, 5 M)	3 x 3 Tage	15 und 40	↓ in GE höher als CON	↓ GE	↓ GE
(Murphy, Bilek, & Koehler, 2021)	n = 7	3 x 5 Tage	15 und 40	↓ GE	↓	↓
(Papageorgiou, et al., 2017)	n = 22 (11 W, 11 M)	2 x 9 Tage	15 und 45	↓ GE	k.A.	k.A.

CON Kontrollgruppe, FFM Fettfreie Körpermasse, GE Geringe Energieverfügbarkeit, k.A. keine Angabe, M männlich, W weiblich ↓ Abnahme, ↔ nicht signifikant

3.2 Endokrine Funktion

In vier der ausgewählten Studien wurden signifikante Ergebnisse zu Parametern der endokrinen Funktion im Zusammenhang mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit untersucht. Eine Auflistung der Ergebnisse ist in Tabelle 4 angegeben.

Degoutte, et. al. (2006) beobachteten bei zehn Judoathleten der Gruppe A (Diätgruppe) eine signifikante Abnahme von Insulin zum Zeitpunkt T_2 (nach der Diät) im Gegensatz zu den Werten zum Zeitpunkt T_1 (vor Beginn der Diät) (Degoutte, et al., 2006). Außerdem kam es zu einer Zunahme von Cortisol, Dehydroepiandrosteron-Sulfat (DHEA-S) und Adrenocorticotropin (ACTH) in Gruppe A (T_2). Nach dem Wettkampf (T_3) fand keine weitere Zunahme statt. In Gruppe B wurden keine signifikanten Veränderungen entdeckt (Degoutte, et al., 2006).

Auch Koehler, et al. (2016) stellten in den Gruppen mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit im Gegensatz zur Kontrollgruppe eine Abnahme an Leptin fest (Koehler, et al., 2016). Ein Unterschied zwischen LEA und LEA + EX wurde nicht beobachtet. Ebenso fand eine Abnahme von Insulin in den Konditionen mit einer geringen Energieverfügbarkeit statt. Zu diesen Ergebnissen kamen Koehler, et al. (2016) nach einer Post-hoc-Analyse. Dort stellten sie auch fest, dass in der Kondition inklusive Trainings eine höhere Abnahme an Insulin vorlag als ohne Training. Es wurden keine signifikanten Veränderungen von Trijodthyronin (T_3) beobachtet (Koehler, et al., 2016).

Die Abnahme an Leptin bei einer niedrigen Energieverfügbarkeit konnte in weiteren Studien wiederholt beobachtet werden (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021).

Veränderungen in T_3 , Insulin und Leptin fielen laut Papageorgiou, et al. (2017) bei den elf männlichen Studienteilnehmern, trotz geringer Energieverfügbarkeit, nicht signifikant aus. Bei den elf weiblichen Teilnehmerinnen hingegen, konnten in selbiger Studie signifikante Unterschiede der Insulin- und Leptinwerte festgestellt werden (Papageorgiou, et al., 2017).

Tabelle 4: Ergebnisse zu Parametern der endokrinen Funktion, eigene Darstellung

Studie	Population	Dauer	Energieverfügbarkeit (kcal/kg FFM/Tag)	Insulin	Leptin	Cortisol	T3
(Degoutte, et al., 2006)	n = 20	7 Tage	k.A.	↓ GE	k.A.	↑	↔
(Koehler, et al., 2016)	n = 6	4 x 4 Tage	16 und 40	↓ GE	↓ GE	k.A.	↔
(Murphy, Bilek, & Koehler, 2021)	n = 7	3 x 5 Tage	15 und 40	k.A.	↓	k.A.	k.A.
(Papageorgiou, et al., 2017)	n = 22 (11 W, 11 M)	2 x 9 Tage	15 und 45	↔	↔ (M) ↓ (W)	k.A.	↔

GE Geringe Energieverfügbarkeit, k.A. keine Angabe, M männlich, T3 Trijodthyronin, W weiblich, ↓ Abnahme, ↑ Zunahme, ↔ nicht signifikant

3.3 Knochengesundheit

Serummarker für den Knochenstoffwechsel wie Sclerostin, Prokollagen-Typ-1-N-terminales Propeptid (P1NP) und Carboxyterminale Kollagen-Crosslinks (CTX) wurden in drei Studien und das Wachstumshormon IGF-1 in fünf Studien untersucht, um herauszufinden, inwiefern sich eine geringe Energieverfügbarkeit auf den Knochenstoffwechsel auswirkt. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen aufgeführt. In drei Studien wurden nicht die Serummarker selbst, sondern die generelle die Knochenmineraldichte betrachtet. Diese Ergebnisse werden nicht in der Tabelle aufgeführt.

Koehler, et al. (2016) untersuchten in Bezug auf die Knochengesundheit die IGF-1-Konzentration. Diesbezüglich, konnten sie eine Zunahme in den Kontrollgruppen, nicht aber in den Konditionen mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit feststellen. Im Vergleich der beiden Kontrollkonditionen, war eine stärkere Zunahme an IGF-1 in der Kondition ohne Training erfasst worden (Koehler, et al., 2016).

Bei den 18 Elite-Wrestlern, die Karila, et al. (2008) untersuchten blieben die Werte zur Knochenmasse und Knochenmineraldichte bei den Messungen unverändert (Karila, et al., 2008).

Kojima, et al. (2020) konnten bei den Teilnehmern eine Abnahme des IGF-1 beobachten. Dabei war die IGF-1-Konzentration in der Gruppe mit einer geringen Energieverfügbarkeit signifikant niedriger als in der Gruppe mit einer normalen Energieverfügbarkeit (Kojima, et al., 2020).

Anhand einer beobachtenden Querschnittsstudie untersuchten Lane, et al. (2021), bei nicht elitären männlichen Ausdauersportlern, die Energieverfügbarkeit und die Risikofaktoren für RED-S (Lane, et al., 2021). Es nahmen 60 Ausdauersportler, darunter 27 Läufer, 21 Fahrradfahrer, sieben Triathleten und fünf weitere Sportler mit verschiedenen Disziplin Kombinationen, an der Studie teil. Voraussetzung an der Teilnahme war unter anderem, ein wöchentliches Trainingsvolumen von 7 – 10 Stunden und die Vorbereitung für einen Ausdauerwettkampf. Die Teilnehmer wurden zweimal im Labor untersucht, in dem der Ruheumsatz, die Knochenmineraldichte, sowie hormonellen Biomarker im Blut und die maximale aerobe Kapazität bestimmt wurden. Zwischen den Untersuchungen lagen sieben Tage. In dieser Zeit erhielten die Teilnehmer Vorgaben zur Ernährung und Training (Lane, et al., 2021). Die Energiezufuhr und der Energieverbrauch im Training wurden über ein Ernährungs- und Trainingsprotokoll festgestellt.

Alle Teilnehmer wurden nach der maximalen aeroben Kapazität (VO_{2max}) in ein hohes kardiovaskuläres Fitnesslevel eingestuft. Eine geringe Energieverfügbarkeit, die durch < 30 kcal/kg FFM/Tag definiert worden ist, konnte mit der Knochenmineraldichte in einen schwachen negativen Zusammenhang in Verbindung gebracht werden. Folglich nahm die Knochenmineraldichte mit einer geringeren Energieverfügbarkeit überraschend zu. Daraufhin wurde eine Post-hoc-Analyse durchgeführt, in der die Teilnehmer in zwei Gruppen eingeteilt wurden: (1) mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit (< 30 kcal/kg FFM/Tag) und (2) mit einer angemessene Energieverfügbarkeit (≥ 30 kcal/kg FFM/Tag). Die Teilnehmer der Gruppe (1) ($n= 37$) wiesen signifikant höhere Z-Scores auf als die Kontrollgruppe (2). Hier ist noch anzumerken, dass in beiden Gruppen die Varianz hoch war. Ansonsten konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen einer geringen Energieverfügbarkeit und den gemessenen Parametern entdeckt werden. Eine durchgeführte Korrelationsanalyse innerhalb der beiden Gruppen und der Gesamtkörper-Knochenmineraldichte (Z-Scores) ergab keine signifikanten Zusammenhänge (Lane, et al., 2021)

Moore, et al. (2021) untersuchten ebenfalls die Komponenten der „Male Athlete Triad“ bei Ausdauersportlern. Dabei wurden die Parameter Energiebedarf (inkl. Energiezufuhr, -verbrauch und -verfügbarkeit), Testosteronspiegel und Knochenmineraldichte in unterschiedlichen Trainingsphasen betrachtet (Moore, et al., 2021). 14 Ausdauersportler nahmen an der Studie teil. Die Studie bestand aus zwei Trainingsphasen in denen die Ernährung sowie das Training von den Athleten dokumentiert

und zusätzlich eine Blutentnahme, als auch eine DXA-Messung durchgeführt wurde. In der „High Volume“ Woche sollten die Teilnehmer ≥ 5 Trainingstage mit ≥ 10 Stunden Training innerhalb von sieben Tagen absolvieren. In der „Recovery/Low Volume“ Woche gab es die Anforderung von Minimum zwei bis drei Trainingstagen in sieben Tagen.

Insgesamt wurde bei 64,3 % (n = 9) der Teilnehmer während der zwei Trainingswochen eine geringe Energieverfügbarkeit beobachtet. Keine Studienteilnehmer wiesen eine niedrige Knochenmineraldichte auf. Zwei Teilnehmer, die neben Ausdauersport zusätzlich Gewichtheben durchführten, lagen über einem Z-Score von 2 (Moore, et al., 2021).

Murphy und Koehler (2020) beobachteten in ihrer Studie eine Zunahme vom Wachstumshormon (GH) nach dem Training in allen Konditionen. Die GH-Konzentration sank jedoch eine Stunde nach dem Training wieder auf den Ausgangswert. Die Zunahme von GH war in den Gruppen mit einer geringen Energieverfügbarkeit signifikant höher als in der Kontrollgruppe. Währenddessen wurde keine signifikante Abnahme von IGF-1 in den ersten beiden Tagen vor dem Widerstandstraining beobachtet. Nach dem Training an Tag drei fand eine Abnahme von IGF-1 statt, wobei auch hier in den Gruppen mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit (CRC, CRP) eine stärkere Abnahme vorlag als in der Kontrollgruppe. Zwischen CRC und CRP konnte kein Unterschied festgestellt werden. Es wurde zudem ein Anstieg von Sclerostin vor dem Widerstandstraining und eine Reduzierung nach dem Training beobachtet. P1NP nahm in CRP vor dem Training zu und in der Kontrollgruppe fand eine nicht signifikante Zunahme statt. 24 Stunden nach dem Training nahm P1NP in der Kontrollgruppe ab. Sämtliche Veränderungen von P1NP als Ganzes (Tag 1 bis 4) betrachtet, wurden als nicht signifikant eingestuft (Murphy & Koehler, 2020).

Murphy, et al. (2021) untersuchten in ihrer Studie die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit in Kombination mit einer geringen Proteinzufuhr auf die Knochengesundheit. Dabei war eine Reduktion von P1NP und Zunahme von CTX-I bei Teilnehmern mit einer geringen Energieverfügbarkeit größer als bei der Kontrollgruppe. Veränderungen des IGF-1 wurden währenddessen als nicht signifikant bewertet. Eine hohe bzw. niedrige Proteinzufuhr hatte dabei nur einen unbedeutenden Effekt auf die Knochengesundheit (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021).

Unterschiede in den Serummarkern zum Knochenstoffwechsel wurden ebenfalls von Papageorgiou, et al. (2017) untersucht. Hier stachen vor allem die Geschlechtsunterschiede bei den Messungen hervor. Bei Männern konnten keine signifikanten Unterschiede in β -CTX und P1NP zwischen der Restriktionsdiät-Gruppe und Kontrollgruppe beobachtet werden, während sich in den meisten Fällen bei Frauen signifikante Unterschiede in β -CTX und P1NP zeigten (Papageorgiou, et al., 2017). Zu IGF-1 und Sclerostin wurden bei den elf männlichen Studienteilnehmern ebenfalls keine bedeutenden Veränderungen festgestellt (Papageorgiou, et al., 2017).

Tabelle 5: Ergebnisse zu Parametern der Knochengesundheit, eigene Darstellung

Studie	Popu- lation	Dauer (Tage)	Energie- verfüg- barkeit (kcal/kg FFM/Tag)	IGF-1	P1NP	CTX/ β-CTX	Scleros- tin
(Koehler, et al., 2016)	n = 6	4 x 4 Tage	16 und 40	↔	k.A.	k.A.	k.A.
(Kojima, et al., 2020)	n = 7	2 x 3 Tage	19 und 53	↓ GE	k.A.	k.A.	k.A.
(Murphy & Koehler, 2020)	n = 7 (2 W, 5 M)	3 x 3 Tage	15 und 40	↓ GE	↔	k.A.	↑ Anstieg vor Trai- ning, Wieder- herstel- lung nach dem Trai- ning
(Murphy, Bilek, & Koehler, 2021)	n = 7	3 x 5 Tage	15 und 40	↔	↓ GE	↑ CTX	↔
(Papageorgiou, et al., 2017)	n = 22 (11 W, 11 M)	2 x 9 Tage	15 und 45	↔	↔	↔ β-CTX	↔

CTX Carboxyterminale Kollagen-Crosslinks, GE Geringe Energieverfügbarkeit, IGF-1 insulinähnlichen Wachstumsfaktoren, k.A. keine Angabe, M männlich, P1NP Prokollagen-Typ-1-N-terminales Propeptid, W weiblich, ↓ Abnahme, ↑ Zunahme, ↔ nicht signifikant

3.4 Fortpflanzungsfunktion

Um Störungen in der Fortpflanzungsfunktion feststellen zu können, wurden die Testosteron- und LH-Konzentrationen unter der Bedingung einer geringen Energieverfügbarkeit, untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 gesammelt aufgezeigt.

Degoutte, et al. (2006) beobachteten bei der Messung am Zeitpunkt T₂, (nach der Restriktionsdiät), im Gegensatz zu den Werten aus T₁ (vor der Diät) eine signifikante Testosteronabnahme (Degoutte, et al., 2006).

Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangten Karila, et al. (2008) Nach der Gewichtsreduktion kam es bei den untersuchten Elite-Wrestlern, zu einer Abnahme von Testosteron und LH. Es wurde ebenfalls eine signifikante Korrelation zwischen der Testosteronreduktion und der Gewichtsabnahme beobachtet (Karila, et al., 2008). Auch Kojima, et al. (2020) wiesen eine signifikante Abnahme der Testosteronkonzentration am Ende einer Trainingsperiode, gepaart mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit, nach (Kojima, et al., 2020).

Lane, et al. (2021) hingegen fanden keinen Zusammenhang zwischen einer geringen Energieverfügbarkeit und den Fortpflanzungshormonwerten. Die Testosteron- und LH-Werte befanden sich im normalen Bereich (Lane, et al., 2021). Auch Moore, et al. (2021) beobachteten in beiden Wochen (High Volume und Low Volume) Testosteronwerte im Normalbereich (Moore, et al., 2021). Die Ergebnisse von Moore, et al. (2021) decken sich mit den Ergebnissen von Koehler, et al., (2016) wo bei sechs Fahrradfahrern mit einer geringen Energieverfügbarkeit (16 kcal/kg FFM/Tag) ebenfalls keine Veränderung der Testosteronkonzentration nachweisen werden konnten (Koehler, et al., 2016).

Tabelle 6: Ergebnisse zu Parametern der Fortpflanzungsfunktion, eigene Darstellung

Studie	Population	Dauer	Energieverfügbarkeit (kcal/kg FFM/Tag)	Testosteron	LH
(Degoutte, et al., 2006)	n = 20	7 Tage	k.A.	↓	k.A.
(Karila, et al., 2008)	n = 18	2 - 3 Wochen	k.A.	↓	↓
(Koehler, et al., 2016)	n = 6	4 x 4 Tage	16 und 40	↔	k.A.
(Kojima, et al., 2020)	n = 7	2 x 3 Tage	19 und 53	↓	k.A.
(Lane, et al., 2021)	n = 60	7 Tage	29	↔	↔
(Moore, et al., 2021)	n = 14	2 x 7 Tage	25 und 30	↔	k.A.

GE Geringe Energieverfügbarkeit, k.A. keine Angabe, LH luteinisierendes Hormon, M männlich, W weiblich, ↓ Abnahme, ↑ Zunahme, ↔ nicht signifikant

4. Diskussion

Die vorliegende Arbeit bietet einen Überblick über die aktuellen Erkenntnisse zu den Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf bestimmte Gesundheitsparameter bei männlichen Athleten. Dabei wurden Parameter zur endokrinen Funktion, Knochengesundheit und Fortpflanzungsfunktion vorgestellt und sollen nun im Folgenden in den Forschungshintergrund eingeordnet werden.

4.1 Methodendiskussion

Bei der systematischen Literaturrecherche können trotz sorgfältiger Recherche Fehler unterlaufen und Studien übersehen werden, die themenrelevant sind. Diese Fehler können durch die Auswahl der Stichworte und die Filtereingrenzungen auftreten. Die Eingrenzung auf frei verfügbare Texte hat den Nachteil, dass womöglich repräsentative Studien ausgeschlossen wurden. Deshalb bietet diese Arbeit ausschließlich einen Ausschnitt der vorhandenen Studienlage an.

Es wurde auf drei Datenbanken zugegriffen, jedoch wurden nur Studien aus der Datenbank PubMed.gov für den Ergebnisteil verwendet. Die Datenbank PubMed.gov wurde bei der Recherche als erstes gewählt, sodass sich die Ergebnisse in den anderen Datenbanken ScienceDirect und Google Scholar wiederholten, statt neue Ergebnisse zu liefern. Google Scholar und ScienceDirect dienten deshalb hierbei nur der Unterstützung, indem sie die selben Studien angaben. Außerdem konnten bei Google Scholar weniger Filter gesetzt werden als bei PubMed.gov, weshalb nach unterschiedlicher Literatur gesucht wurde. Bei ScienceDirect waren genug Filter zum Eingrenzen möglich, jedoch gab es auch hier qualitative Unterschiede zur Datenbank PubMed.gov. Trotz starker Eingrenzung bei ScienceDirect und dem Verwenden von verschiedenen Stichworten, wurde eine Vielzahl an Treffern angezeigt, die nicht themenrelevant waren.

Zudem wurden aufgrund der Datenlage nicht nur RCT-Studien miteinbezogen, sondern auch Studien mit einer geringeren Evidenzlage. Teilweise konnten Zitate und Literaturverweise genutzt werden, um weitere hilfreiche Studien ausfindig zu machen und die initiale Suche zu ergänzen. Dabei handelt es sich um die Studien von Degoutte, et al. (2006), Karila, et al. (2008), Kojima, et al. (2020) und Murphy und Koehler (2020). Die Knappheit veröffentlichter Studien, die mögliche Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit bei männlichen Sportlern untersuchen, wurde bereits betont. Ein Fokus auf einzelne Gesundheitsparameter, hätte die Literatur auf ein Minimum beschränkt. Die Fragestellung dieser Arbeit wurde deshalb globaler formuliert, um möglichst viele relevante Suchergebnisse einbeziehen und vor allem, um mögliche Parallelen zwischen verschiedenen Parametern ausmachen zu können. Folglich wurden teilweise auch Studien berücksichtigt, die lediglich einen relevanten Gesundheitsparameter beleuchten. So konnte trotz der Knappheit an Forschung in diesem Feld eine verhältnismäßig große Anzahl an Studien ($n = 9$) erfasst werden.

4.2 Ergebnisdiskussion

4.2.1 Energieverfügbarkeit

Eine Energieverfügbarkeit, die mit einem Risiko für Beeinträchtigungen der Gesundheit einhergeht, wurde als < 30 kcal/kg FFM/Tag definiert (Mountjoy, et al., 2018). Alle erwähnten Studien wiesen in ihren untersuchten Gruppen eine kurzfristige niedrige Energieverfügbarkeit auf. Dieser Grenzwert wurde jedoch für weibliche Sportlerinnen definiert, weshalb sich die Frage stellt, ob dieser Wert auch für die Beurteilung des Risikos bei Männern ausreicht. Es wurde dementsprechend vorgeschlagen, für Männer einen niedrigeren Wert zu verwenden (Fagerberg, 2018). Da Männer durch verschiedene körperliche Voraussetzungen einen allgemein höheren Energiebedarf haben und in der Literatur bei einem Wert von 30 kcal/kg FFM/Tag wenig Veränderungen festgestellt wurden. Bis auf die Studien von Lane, et al. (2021) und Moore, et al. (2021), die eine Energieverfügbarkeit von 29 kcal/kg FFM/Tag, respektive 25 kcal/kg FFM/Tag aufwiesen, wurde in allen Studien mit 15 – 20 kcal/kg FFM/Tag ein Richtwert genutzt, der weit unter den 30 kcal/kg FFM/Tag liegt.

Die Messung der Energieverfügbarkeit ist jedoch sehr fehleranfällig und aufwendig, weshalb oftmals ein Schätzwert verwendet wird. Dieser ist an sich schon ungenau. Ebenfalls fehleranfällig ist die Dokumentation der Energiezufuhr und des Energieverbrauchs. Dabei können den Proband*innen Fehler in der Dokumentation unterlaufen, indem sie beispielsweise Mengen falsch abwägen oder Informationen zum Ess- und Trainingsverhalten falsch wiedergeben. Außerdem kommt es bei vielen Sportler*innen aufgrund von wechselnden Trainingsphasen zu einer eingeschränkten oder erhöhten Energiezufuhr (Braun, et al., 2019). Durch fehlerhafte Bewertung der Ernährungssituation, lückenhaften Angaben, Dokumentationsfehler und durch die eine stark schwankende Energiezufuhr aufgrund von Trainings- und Wettkampfsbelastung kommt es oftmals zu einer ebenso fehlerhaften Einschätzung der Energiezufuhr (Braun, et al., 2019). Auch bei der Erfassung des Energieverbrauches kann es zu Ungenauigkeiten kommen, da es verschiedenste Verfahren zur Schätzung gibt und jeder Mensch unterschiedlich viel Energie verbraucht. Es stellt sich dadurch die Frage, in welchem Maße die Schätzwerte von den tatsächlichen Werten abweichen.

Degoutte, et al. (2006) stellten den Teilnehmern frei, was sie essen. Sie mussten ihre Nahrungsaufnahme lediglich selbst dokumentieren (Degoutte, et al., 2006). Karila, et al. (2008) wiederum nutzten ein individuelles Ernährungsprogramm, wobei das Energiedefizit abhängig vom täglichen Trainingsumsatz und der Gewichtsabnahme (im Laufe der Intervention) war (Karila, et al., 2008). Im Gegensatz zu den anderen Studien, wurde in diesen beiden Fällen nicht die Energieverfügbarkeit definiert. Dadurch kann trotz vorliegendem Energiedefizit und körperlicher Aktivität nicht eingeschätzt werden ob tatsächlich ein relatives Energiedefizit vorliegt. Hier wurden lediglich die Auswirkungen

einer eingeschränkten Energie- und Flüssigkeitszufuhr (Degoutte, et al., 2006) und Gewichtsreduktion (Karila, et al., 2008) untersucht, aber es wurde nicht auf die Energieverfügbarkeit eingegangen. Demgegenüber stehen die Studien von Koehler, et al. (2016) und auch Kojima, et al. (2020). Sie berechneten die Energieverfügbarkeit ihrer Teilnehmer anhand der Energiezufuhr und des Energieaufwands beim Training. Zur Schätzung des Ruheenergieumsatzes verwendeten Koehler, et al. (2016) die Cunningham Formel, bei einem für alle Teilnehmer geltenden ein Physical Activity Level (PAL) Wert von 1,7 (Koehler, et al., 2016). Der Energieaufwand beim Training wurde in den beiden genannten Studien anhand der Weir-Formel ermittelt. Auch in weiteren Studien wie von Lane, et al. (2021) und Moore, et al. (2021) wird die Energieaufnahme anhand von Ernährungsprotokollen dokumentiert und überprüft. In den beiden Studien wird zur Ermittlung der Energieverfügbarkeit zusätzlich noch die Ruhestoffwechselrate (RMR) verwendet. In noch anderen Studien werden unter anderem individuell vorgefertigte Produkte (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021) oder Mahlzeiten (Papageorgiou, et al., 2017) an die Teilnehmer*innen verteilt, zur Sicherstellung einer geringen Energieverfügbarkeit. Eine Gewährleistung, dass die Teilnehmer*innen nicht noch zusätzlich Nahrung oder kalorische Getränke zu sich nehmen, ist jedoch nicht gegeben.

Es ist schwierig festzustellen, wann tatsächlich ein relatives Energiedefizit und somit eine geringe Energieverfügbarkeit vorliegt. In der Folge ist es schwer gesundheitliche Folgen direkt auf die geringe Energieverfügbarkeit zurückzuführen und nicht etwa auf andere zeitgleich auftretende Zustände, wie beispielsweise ein Kaloriendefizit oder ein Übertraining.

4.2.2 Körpergewicht und -zusammensetzung

In sieben von neun Studien, in der eine geringe Energieverfügbarkeit durch eine eingeschränkte Energiezufuhr, erhöhte körperliche Aktivität oder die Kombination aus beidem vorlag, konnte ein reduziertes Körpergewicht beobachtet werden. Es liegt somit ein Energiedefizit vor. In den Kontrollgruppen liegt eine Energieverfügbarkeit von 40 – 50 kcal/kg FFM/Tag vor, die nicht zu einer Gewichtsreduktion bei den Teilnehmer*innen führte. In sechs Studien wurden ebenfalls Werte zur fettfreien Masse (FFM) gegeben. In fünf dieser sechs Studien wurde eine signifikante Abnahme der FFM in den Gruppen mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit beobachtet, außer Koehler, et al. (2016), die weder bei einer geringen Energieverfügbarkeit noch in Kombination mit Training eine Signifikanz in der Reduktion der FFM beobachteten (Koehler, et al., 2016). Analog dazu waren auch die Ergebnisse von Kojima, et al. (2020) zum Körperfett (kg) nicht signifikant (Kojima, et al., 2020). In anderen Studien hingegen konnte eine signifikante Abnahme beobachtet werden. Solche Abweichungen sind vermutlich auf unterschiedliche Messmethoden, die Stichprobengröße, die Interventionslänge und individuelle Gegebenheiten der Studienteilnehmer*innen zurückzuführen.

Die Ruhestoffwechselrate (RMR) wurde bei Lane, et al. (2021) und Moore, et al. (2021) als Surrogatparameter für einen Energiemangel (Lane, et al., 2021) und zur Energiebewertung (Moore, et al., 2021) genutzt. Trotz einer niedrigen Energieverfügbarkeit entsprach das RMR-Verhältnis nicht dem vorgeschlagenen Surrogatniveau für eine niedrige Energieverfügbarkeit ($< 0,90$) (Lane, et al., 2021). Auch Kojima, et al., (2020) verdeutlichten, dass eine dreitägige niedrige Energieverfügbarkeit keinen signifikanten Einfluss auf die RMR hat (Kojima, et al., 2020). Weshalb sich die Frage stellt, ob sich die RMR als Surrogat für eine geringe Energieverfügbarkeit bei Männern überhaupt eignet. Auch die Länge von drei Tagen, in der die Teilnehmer eine niedrige Energieverfügbarkeit aufwiesen, kann ein Grund sein, warum keine signifikanten Veränderungen beobachtet wurden.

4.2.3 Endokrine Funktion

Auffällig ist die Heterogenität der Ergebnisse bezüglich wichtiger Stoffwechselhormone, trotz ähnlicher Studiengegebenheiten. In allen Studien lag eine geringe Energieverfügbarkeit vor. Eine signifikante Abnahme von Leptin beobachteten Murphy, et al. (2021) und Koehler, et al. (2016). Eine Verringerung von Leptin, kann zu einer Unterdrückung der Fortpflanzungs- Wachstumshormon- und Schilddrüsenachse führen (Koehler, et al., 2016) und könnte als Parameter zur Beurteilung eines Energiedefizits dienen. Papageorgiou, et al. (2017) verglichen in ihrer Studie zwischen dem weiblichen und männlichen Geschlecht. Während bei den Frauen ein Rückgang von Leptin als signifikante Veränderung beobachtet wurde, gab es für die Leptinwerte beim männlichen Geschlecht keine signifikanten Veränderungen (Papageorgiou, et al., 2017). Der Rückgang an Leptin bei Frauen hängt vermutlich mit Veränderungen der Knochenumsatzmarker zusammen, da Leptin direkte sowie indirekte Auswirkungen auf den Knochenstoffwechsel hat (Papageorgiou, et al., 2017). Da bei männlichen Teilnehmern der Studie keine Veränderungen der Knochenumsatzmarker beobachtet werden konnten, liegt die Vermutung nahe, dass dies auch keine Veränderung der Leptinwerte mit sich zieht (Papageorgiou, et al., 2017). Die Ergebnisse der Studie von Papageorgiou, et al. (2017) zeigen, dass die Auswirkungen einer niedrigen Energieverfügbarkeit unterschiedlich ausfallen und geschlechtsspezifisch sind (Papageorgiou, et al., 2017).

Eine Reduktion von Insulin beobachteten Degoutte, et al. (2006) und Koehler, et al. (2016) bei ihren Teilnehmer*innen. Eine Kausalität durch die niedrige Energieverfügbarkeit kann dennoch nicht nachgewiesen werden, da die Abnahme an Insulin auch durch andere vorliegende Faktoren begünstigt sein könnte. Beispielsweise durch das Fehlen an Zucker in den Zellen durch die verminderte Nahrungszufuhr. Koehler, et al. (2016) vermuteten, dass durch eine erhöhte Konzentration an Bindungsproteinen die Unterdrückung der endokrinen Funktion während der vorliegenden niedrigen Energieverfügbarkeit abgeschwächt wurde (Koehler, et al., 2016). Die Vermutung ist jedoch nicht

belegt, da das Vorkommen von Bindungsproteinen in der Studie nicht untersucht wurde (Koehler, et al., 2016).

Eine Zunahme von Cortisol wurde nur bei den Teilnehmern von Degoutte, et al. (2006) beobachtet, die einer Nahrungsrestriktion unterlagen (Degoutte, et al., 2006). Es wurde angenommen, dass die verminderte Nahrungszufuhr einen Stressfaktor darstellt und die eingeschränkte Kohlenhydratzufuhr zur Erhöhung von Cortisol und gleichzeitig zu einer Erhöhung von ACTH und DHEA-S führte (Degoutte, et al., 2006). Sie vermuten, dass die Insulinsekretion mit einer Abnahme von DHEA-S einhergeht, weshalb die beobachtete Insulinreduktion zu der erwarteten Zunahme von DHEA-S führte (Degoutte, et al., 2006). In diesem Zusammenhang wurde die niedrige Energieverfügbarkeit nicht beachtet, weshalb die Beziehung des Cortisol-Anstiegs und der geringen Energieverfügbarkeit nur mit Vorsicht interpretiert werden sollte.

In keiner der Studien konnte bei Männern eine signifikante T3-Reduktion beobachtet werden. Eine kurzfristige niedrige Energieverfügbarkeit führt demnach bei männlichen Athleten nicht zu einer Reduktion des Schilddrüsenhormons T3.

Die weibliche Physiologie scheint gegenüber einer geringen Energieverfügbarkeit empfindlicher zu sein als die männliche (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Es wird vermutet, dass diese hormonellen Veränderungen auftreten, damit die Energie für andere Körperfunktionen oder lebenswichtige Prozesse gespart und genutzt wird (Mountjoy, et al., 2018). Die deutlicheren hormonellen Veränderungen bei Frauen (z.B. Leptin-Abnahme) könnten in diesem Zusammenhang ein Anzeichen für die Energieerhaltung darstellen (Areta, Taylor, & Koehler, 2021). Während bei Männern nicht eindeutig ist, ob die beobachtete Leptin-Abnahme in zwei Studien aufgrund der geringeren Energie oder anderer Faktoren vorlag.

Insgesamt, wurden nur vereinzelt signifikante hormonelle Veränderungen beobachtet. Abnahmen von Insulin und Leptin wurden in nur zwei Studien beobachtet. Eine Veränderung der Cortisol-Werte wurde nur in einer Studie untersucht, während zu T3 keine signifikanten Ergebnisse vorlagen. Hier sind weitere Studien notwendig, in denen eine geringere Energieverfügbarkeit über einen längeren Zeitraum untersucht wird, um die endokrine Reaktion auf eine geringe Energieverfügbarkeit zu verstehen und damit auch ihre hormonellen Veränderungen.

4.2.4 Knochengesundheit

In zwei Studien wurde die Knochengesundheit anhand des Z-Scores und Knochenmineraldichte beurteilt. Moore, et al. (2021) stellten jedoch keine niedrigere Knochenmineraldichte bei ihren Teilnehmern fest, was möglicherweise daran lag, dass einige Teilnehmer aktiv Krafttraining ausübten

oder, dass der Untersuchungszeitraum zu kurz war (Moore, et al., 2021). Während Moore, et al. (2021) nur bei zwei Probanden einen Z-Score von 2 beobachtete, stellten Lane, et al. (2021) signifikant höhere Werte in der geringen Energieverfügbarkeitsgruppe fest als in der Kontrollgruppe (Lane, et al., 2021). Zu beachten ist hierbei die Anzahl der Teilnehmenden, die in den beiden Gruppen stark variiert (geringe Energieverfügbarkeitsgruppe n = 37, Kontrollgruppe n = 23), was die Unterschiede in der Signifikanz erklären könnte (Lane, et al., 2021).

Dass in lediglich zwei Studien der Z-Score als Bewertungsparameter für die Knochengesundheit genutzt wird, kann daran liegen, dass diese Werte für Sportler nicht repräsentativ sind. Athleten weisen meist andere anthropometrische Werte auf als eine Durchschnittsperson (Sale & Elliott-Sale, 2019). Außerdem sind die Interventionszeiträume wahrscheinlich zu kurz, um langfristige Folgen einer geringen Energieverfügbarkeit auf die Knochengesundheit zu untersuchen. Für genauere Erkenntnisse zur Knochengesundheit sollten eher Knochenumsatzmarker untersucht werden.

Untersuchungen der Knochenumsatzmarker standen im Fokus einiger anderer Studien. Allerdings können auch hier wenig signifikante Veränderungen beobachtet werden. Koehler, et al. (2016) konnten bei keiner der sechs Proband*innen eine Veränderung in den IGF-1-Werten beobachten (Koehler, et al., 2016). Sie vermuteten, dass eine geringe Leptin-Konzentration diese Veränderung verhinderte (Koehler, et al., 2016). Unterdessen berichten Studien wie Kojima, et al. (2020) und Murphy und Koehler (2020) und teilweise Papageorgiou, et al. (2017) von einer Reduktion von IGF-1. Murphy und Koehler (2020) beobachteten die Abnahme von IGF-1 24 Stunden nach dem Widerstandstraining, während direkt nach dem Training eine erhöhte GH-Konzentration vorlag (Murphy & Koehler, 2020). Die IGF-1 Sekretion durch GH ist scheinbar während eingeschränkter Nahrungszufuhr beeinträchtigt. Es wird vermutet, dass sich diese Veränderung negativ auf das Ziel eines Widerstandstraining auswirkt (Murphy & Koehler, 2020). Schließlich wirkt sich Widerstandstraining unter anderem positiv auf die Knochenbildung und -dichte aus, was durch eine niedrige IGF-1 Konzentration verringert wird (Murphy & Koehler, 2020). Kojima, et al. (2020) konnten nach vier Tagen Ausdauertraining in Kombination mit einer niedrigen Energieverfügbarkeit, eine geringere IGF-1 Konzentration beobachten als in der Kontrollgruppe (Kojima, et al., 2020). Vor dem Hintergrund, dass IGF-1 anabole Eigenschaften beeinflusst und am Muskelwachstum beteiligt ist, wird durch das Training und Nahrungsrestriktion ein kataboler Zustand verursacht, der die Verringerung an IGF-1 erklärt (Kojima, et al., 2020). Murphy, et al. (2021) die keine signifikanten Veränderungen bei IGF-1 festgestellt haben, mutmaßen, dass bei Männern, aufgrund einer höheren fettfreien Körpermasse eine erhöhte IGF-1 Synthese durch die Skelettmuskulatur vorliegt (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021). Das sei auch der Grund, wieso eine Abnahme von IGF-1 nicht beobachtet wurde (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021).

Hierbei ist noch anzumerken, dass in den Studien verschiedene Trainingsmodi absolviert wurden und in einigen auch eine andere Energieverfügbarkeit vorlag, was zu Unterschieden in den Ergebnissen führen kann.

Murphy und Koehler (2020) beobachteten eine Zunahme an Sclerostin bereits nach zwei Tagen mit einer geringen Energieverfügbarkeit, was mit einer gehemmten Knochenbildung einhergeht (Murphy & Koehler, 2020). Die Sclerostin-Konzentration erreichte jedoch nach dem Training wieder eine Normalkonzentration. Scheinbar hat eine körperliche Belastung einen senkenden Einfluss auf die Sclerostin-Konzentration (Murphy & Koehler, 2020). Diese Annahme könnte auch erklären, weshalb Papageorgiou, et al. (2017) und Murphy, et al. (2021) keinen signifikanten Anstieg von Sclerostin feststellen konnten. Die Effekte der körperlichen Belastung (Senken des Sclerostins) gleichen die Effekte einer geringen Energieverfügbarkeit (Anstieg des Sclerostins) auf die Sclerostin-Konzentration aus. Daher wurden nicht in allen Studien, die Sclerostin-Konzentration betrachtet. Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen Murphy und Koehler (2020) und Papageorgiou, et al. (2017) könnten auch aufgrund des unterschiedlichen Trainings aufgetreten sein. Während bei Murphy und Koehler (2020) erst am dritten Tag der Intervention ein Krafttraining ausstand, hatten die Teilnehmer*innen in Papageorgiou, et al. (2017) ein tägliches Ausdauertraining. Nach der Annahme, dass körperliche Betätigung Sclerostin sinken lässt, erklärt es warum bei Papageorgiou, et al. (2017) keine signifikanten Ergebnisse beobachtet wurden, bei Murphy und Koehler (2020) hingegen ein Anstieg vor dem Training vorlag. Welchen Einfluss dabei die Trainingsart (Kraft- oder Ausdauertraining) hat ist nicht aus den Studien zu entnehmen.

Bei P1NP, ebenfalls ein Knochenbildungsmarker, zeigten sich in der Studie von Murphy und Koehler (2020) keine signifikanten Veränderungen. Eine Zunahme konnte sowohl in der Gruppe mit einer geringen Energieverfügbarkeit plus Eiweißzufuhr nach dem Training (caloric restriction + protein CRP) als auch in der Kontrollgruppe verzeichnet werden, in der letzteren nahm sie allerdings innerhalb von 24 Stunden nach dem Krafttraining wieder ab, sodass der P1NP-Wert im Normalbereich lag (Murphy & Koehler, 2020). Eine Reaktion von P1NP auf eine geringe Energieverfügbarkeit beobachteten auch Murphy, et al. (2021). Sie stellten eine Abnahme von P1NP und eine Zunahme von CTX-I fest, was mit einer gestörten Knochenbildung (P1NP) bzw. erhöhten Knochenresorption (CTX-I) assoziiert ist (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021). Die proteinreiche Ernährung in der Studie zeigte dabei eine schützende Wirkung für CTX-I, aber nicht auf P1NP (Murphy, Bilek, & Koehler, 2021). Der Mechanismus, den eine erhöhte Proteinzufuhr auf Knochenumsatzmarker und somit den Knochenstoffwechsel hat, ist noch nicht geklärt. Dadurch, dass Proteine aber an der Bildung von Knochen beteiligt sind, kann aber angenommen werden, dass das Protein, versucht den Knochenabbau zu verhindern und deshalb eine schützende Wirkung auf CTX-I auswirkt. Papageorgiou, et al. (2017) fanden bei den Knochenumsatzmarker P1NP und CTX ebenfalls keine signifikanten

Änderungen (Papageorgiou, et al., 2017). Grund dafür könnte die kurze Dauer der Intervention oder die Höhe der Energieverfügbarkeit sein. Bei sechs von elf Männern wurde jedoch eine Abnahme an P1NP beobachtet und Veränderungen festgestellt, die den Knochenabbau begünstigen (Papageorgiou, et al., 2017). Deshalb kann nicht grundlegend behauptet werden, dass eine niedrige Energieverfügbarkeit nicht den Knochenumsatz von Männern beeinflusst (Papageorgiou, et al., 2017). Hier spielen genetische Faktoren ebenfalls eine Rolle, die auch bereits mit der Knochengesundheit in Verbindung stehen.

Ähnlich wie im vorherigen Abschnitt zur endokrinen Funktion, wurden zu den Knochenmarkern nur vereinzelt Veränderungen beobachtet. Eine Abnahme an IGF-1 konnte in zwei Studien festgestellt werden. Zu den Knochenmarkern, P1NP, CTX und Sclerostin konnte jeweils in einer Studie signifikante Veränderungen (Abnahme an P1NP, Zunahme an CTX und Sclerostin) festgestellt werden. Ein erhöhter CTX- und reduzierter P1NP-Spiegel geht hierbei mit einer erhöhten Knochenresorption einher (Obermayer-Pietsch & Schwetz, 2016), was wiederum ein erhöhtes Risiko für Osteoporose darstellen könnte. Eine Verringerung des Knochenstoffwechsels durch eine geringe Energieverfügbarkeit kann darauf hindeuten, dass eine Umverteilung der verfügbaren Energie stattfindet, um diese für andere lebenswichtige Systeme zu verwenden (Areta, Taylor, & Koehler, 2021).

Aufgrund der widersprüchlichen Erkenntnisse ist weitere Forschungen notwendig, um den Einfluss von körperlicher Aktivität in Kombination mit einer geringen Energieverfügbarkeit auf Knochenmarker zu erklären.

4.2.5 Fortpflanzungsfunktion

Um Aussagen über eine mögliche, reduzierte Fortpflanzungsfunktion bei männlichen Sportlern aufgrund einer verringerten Energieverfügbarkeit zu treffen, wurden die Testosteron- und LH-Werte verglichen.

Eine Reduktion des Testosterons konnte bei drei Studien beobachten werden. Degoutte, et al. (2006) gehen davon aus, dass die Abnahme durch die Kombination aus Dehydration, Nahrungsrestriktion und Judo-Training zustande kam, da eine signifikante Beziehung zwischen den Testosteronwerten, Körperfettanteil und Verlust an Körperfett und Gewicht vorlag (Degoutte, et al., 2006). Karila, et al. (2008) die ebenfalls eine Abnahme am Serumtestosteron beobachteten, gingen davon aus, dass keine Beziehung zwischen der Dehydration und der Testosteronreduktion vorlag (Karila, et al., 2008). Sie erklärten die Abnahme mit der Unterernährung und dem Stress, welchem die Teilnehmer unterlagen (Karila, et al., 2008). Es zeigte sich eine Korrelation zwischen der Gewichtsabnahme und der Abnahme der Testosteronkonzentration, d.h. je mehr Gewicht die Athleten verloren, desto geringer wurde die Testosteronkonzentration (Karila, et al., 2008). Das könnte ein Indikator dafür sein, dass

sich ein zu geringes Körpergewicht negativ auf die Testosteronkonzentration auswirkt und somit die Fortpflanzungsfähigkeit beeinflussen kann. Eine Abnahme an LH beobachteten Karila, et al. (2008) ebenfalls (Karila, et al., 2008). Da LH die Testosteronsekretion anregt, ist es nur wahrscheinlich, dass damit auch eine niedriger Testosteronwert einhergeht. Testosteron ist an verschiedenen Prozessen im Körper beteiligt, u.a. an der Knochenbildung (Mountjoy, et al., 2014). Ein zu niedriger Testosteronspiegel kann dementsprechend zu einem erhöhten Risiko für Osteoporose führen (Mountjoy, et al., 2014). Eine Abnahme an Testosteron wurde auch mit einer niedrigen Knochenmineraldichte in Verbindung gebracht (Hind, Truscott, & Evans, 2006). Dadurch ist auch das Verletzungsrisiko erhöht und die Leistung der Sportler kann darunter leiden.

Bei Degoutte, et al. (2006) wurde von einem Energiedefizit von ca. 955 kcal/Tag gesprochen (Degoutte, et al., 2006). Bei Karila, et al. (2008) nahmen die Teilnehmer in zwei bis drei Wochen $5,7 \pm 1,5$ kg an Gewicht ab, im Vergleich dazu verloren die Teilnehmer der Studie von Koehler, et al. (2016) $2,4 \pm 0,3$ kg innerhalb von vier Tagen (Koehler, et al., 2016). Die schnelle Gewichtsreduktion kann auf die Abnahme von Wasser zurückzuführen sein, welches der Körper am Anfang einer Nahrungsrestriktion schnell verliert. Obwohl eine Abnahme an Testosteron und LH in den genannten Studien sehr wohl durch das vorliegende Energiedefizit ausgelöst werden könnte, ist bei der Interpretation Vorsicht geboten. Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse können die Unterschiede in der Interventionslänge, der Energieverfügbarkeit sowie des Trainings sein. Da bei Degoutte, et al. (2006) und Karila, et al. (2008) keine Energieverfügbarkeit definiert ist, kann dieser Faktor nur schwer mit den anderen Studien verglichen werden. In den Studien kommt aufgrund der Wettkampfvorbereitung noch Stress und Druck dazu, was einen Einfluss auf den Testosteronspiegel haben kann (Karila, et al., 2008).

Auch Kojima, et al. (2020), die unter kontrollierten Bedingungen und kurzer Intervention (drei Tage) ihre Studie durchführten, berichteten eine Abnahme von Testosteron. Durch das Ausdauertraining und der geringen Energieverfügbarkeit entsteht ein kataboler Zustand, was wie beim Wachstumshormon IGF-1, die Reduktion von Testosteron, erklären könnte (Kojima, et al., 2020).

Zusammengefasst wurde eine Reduktion an Testosteron in drei Studien beobachtet, während eine Abnahme von LH nur bei Karila, et al. (2008) festgestellt wurde. Drei Studien, die ebenfalls die Testosteronkonzentration untersuchten, fanden keine Veränderungen während einer geringen Energieverfügbarkeit. Gründe könnten die Robustheit des Testosterons oder die kurzfristige geringere Energieverfügbarkeit sein (Moore, et al., 2021). Das männliche Fortpflanzungssystem scheint weniger Energie zu verbrauchen und reagiert daher nicht so empfindlich auf eine kurzfristige Energieverfügbarkeit wie das weibliche Fortpflanzungssystem (Fagerberg, 2018). Auch hier sind weitere Untersuchungen notwendig mit längeren Interventionszeiträumen notwendig, um Aussagen über die Fortpflanzungsfunktion bei Männern während eines relativen Energiedefizits zu treffen.

4.3 Studiendesign

Die Auswahl des Studiendesigns spielt eine entscheidende Rolle bei der Beantwortung von Fragen in der Forschung (Held, 2010). Dabei sind viele Faktoren zu beachten, um eine möglichst repräsentative Studie durchzuführen. Unter anderem der Stichprobenumfang, die Länge der Intervention, die Auswahl der Studienteilnehmer*innen, die verwendeten Methoden und auch das passende Studiendesign (Held, 2010). Unter den neun verwendeten Studien sind randomisierte, kontrollierte Studien (RCT-Studie), Cross-Over-Studien und Querschnittsstudien zu finden. Die RCT-Studien sind hierbei nachweislich das beste Studiendesign, da durch die Randomisierung der Teilnehmer*innen und das Vorliegen einer Kontrollgruppe besser Vergleiche gezogen werden können (Held, 2010). Bei vier von fünf der randomisierten kontrollierten Studien, wurde gleichzeitig ein Cross-Over-Design durchgeführt. So wird ebenfalls die Veränderung der Parameter bei jedem/r Teilnehmer*in individuell analysiert (Held, 2010). Querschnittsstudien, die bei Lane, et al. (2021) und Moore et al. (2021) durchgeführt wurden, haben den Nachteil, dass intraindividuelle Veränderungen nicht betrachtet werden (Held, 2010), hier wäre das Vorliegen einer Kontrollgruppe besser geeignet.

4.3.1 Stichproben

In den verwendeten Studien wurden stets kleine Stichprobengröße gewählt. Die kleinste Stichprobe betrug fünf (Murphy & Koehler, 2020) und die größte 60 Teilnehmer (Lane, et al., 2021). In der Studie von Murphy und Koehler (2020) betrug die Gesamtstichprobengröße sieben, wovon zwei Frauen in dieser Arbeit ausgeschlossen wurden, weshalb die kleinste Stichprobengröße fünf beträgt. Stichproben dieser Größe können das Risiko für Verzerrungen anheben und eine eingeschränkte Aussagekraft haben. Außerdem sind die beobachteten Veränderungen sehr individuell und es ist schwierig die Erkenntnisse auf eine Gesamtheit von Individuen zu übertragen, weshalb eine externe Validität nicht unbedingt gegeben ist. Die Rekrutierung der Teilnehmer mit unterschiedlichsten Einschluss- und Ausschlusskriterien (Tabelle 7) ist ein Grund, warum eine kleine Stichprobengröße vorliegt. Auch die Orte, an denen Teilnehmer rekrutiert werden, können die Stichprobengröße ebenso beeinflussen. Koehler, et al. (2016) gewannen zum Beispiel ihre Teilnehmer ausschließlich von einer Universität, was die Auswahl an Proband*innen einschränkt.

Tabelle 7: Ein- und Ausschlusskriterien, eigene Darstellung

Studie	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
(Degoutte, et al., 2006)	Männlich, zuvor mehr als dreimal pro Saison aus eigenem Antrieb eine schnelle Gewichtsreduzierung praktiziert	Drogen-, Medikamenten- und Nahrungsergänzungsmittelaufnahme, endokrine oder metabolische Probleme
(Karila, et al., 2008)	k.A.	k.A.
(Koehler, et al., 2016)	Männlich, 18 – 30 Jahre, ≥ 3 Std. gezielte aerobe Übungen pro Woche, BMI: $19 - 25 \text{ kg/m}^2$, ≤ 15 % Körperfett, Gewichtsstabilität (± 3 kg) in den letzten sechs Monaten	Rauchen, frühere oder aktuelle Diagnose einer klinischen Essstörung, Infektionskrankheit in den letzten vier Wochen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder orthopädische Beeinträchtigungen, die eine körperliche Betätigung behindern, Medikamentenverbrauch, Diabetes mellitus
(Kojima, et al., 2020)	Männlich, trainiert, gesund	k.A.
(Lane, et al., 2021)	Männlich, Leistungs- und Ausdauersportler (Läufer, Radfahrer, Triathleten), > 18 Jahre, wöchentliches Trainingsvolumen von 7 - 10 Std. und die Vorbereitung auf Ausdauerwettkämpfe	Längere Verletzungszeit, in den ersten zwei Wochen eines neuen Trainingszyklus oder in den letzten zwei Wochen vor einem Wettkampf, eine Vorgeschichte mit medizinischen oder chirurgischen Ereignissen (einschließlich kardiovaskulärer, endokriner, metabolischer, renaler, hepatischer oder muskuloskelettaler Störungen)
(Moore, et al., 2021)	Männlich, Ausdauersportler (Langstreckenläufer, Triathleten, Hindernisläufer), aktives Training und ≥ 10 Std./Woche für mindestens drei Monate innerhalb einer Wettkampfsaison, Körperfettanteil ≤ 12 %, Gewichtsstabilität (± 3 kg) in den letzten sechs Monaten, eine ausgezeichnete $\text{VO}_{2\text{max}}$	frühere oder aktuelle Diagnose einer klinischen Essstörung, Vorgeschichte mit kardiovaskulären Erkrankungen, Schilddrüsen-, Hypophysen- oder andere Stoffwechselkrankheiten oder orthopädische Beeinträchtigungen, die eine körperliche Betätigung behindern

(Murphy & Koehler, 2020)	Männlich, jung (19 – 30 Jahre), gesund, Nichtraucher, normalen Körperfettanteil (< 20 %), sechs Monate lang wöchentlich vier Stunden gezieltes aerobes Training,	k.A.
(Murphy, Bilek, & Koehler, 2021)	Größen- und gewichtsstabil (< 0,25 Zoll und < 2,5 kg Veränderung in den letzten sechs Monaten), Alter: 19 - 30 Jahren, magerer Körperfettanteil (< 20 % bei Männern, < 30 % bei Frauen), Freizeitsportler*innen mit mindestens drei Jahren Erfahrung im Krafttraining	k.A.
(Papageorgiou, et al., 2017)	Kaukasisch, Alter: 18 - 35 Jahre, Nichtraucher, BMI: 18,5 - 30, innerhalb des letzten Jahres keinen Knochenbruch erlitten, verletzungsfrei, keine Essstörungen in der Vergangenheit, keine Medikamenteneinnahme oder Erkrankungen litten, die den Knochenstoffwechsel beeinträchtigen, ≥ 3 Stunden mäßige bis starke körperliche Betätigung pro Woche und ein mittleres bis hohes Aktivitätsniveau	Oligomenorrhöische Frauen (Menstruationszyklen von 36 - 90 Tagen) und Frauen mit kurzen Menstruationszyklen (Menstruationszyklen < 24 Tage)

4.3.2 Interventionslänge

Die Länge der Interventionen in den Studien war gering. In fast allen Studien lag die Zeitspanne bei drei bis sieben Tagen. Einzig die Interventionslänge bei Karila, et al. (2008) von zwei bis drei Wochen fiel im Gegensatz zu den anderen Studien auf (Karila, et al., 2008). Es handelte sich somit immer um eine kurzfristig vorliegende geringe Energieverfügbarkeit. Die Heterogenität der Ergebnisse zeigt, dass eine kurze Interventionslänge nicht ausreicht, um alle Veränderungen beobachten zu können und belastbare Ergebnisse zu erzielen. Es werden somit nur Veränderungen dargestellt, die bereits nach kurzer Zeit auftreten. Hier sind Studien mit längerer Interventionslänge erforderlich. Dies ist jedoch schwierig in der Umsetzung, da zum einen irreversible Gesundheitsprobleme bei Studienteilnehmer*innen nicht verantwortet werden können. Zum anderen sind diese Studien auch

sehr ressourcenintensiv und bei längeren Interventionen, müssten Teilnehmer ihr Privatleben stark einschränken, um den Forderungen gerecht zu werden. Eine Möglichkeit für die weitere Forschung, könnten Fall-Kontroll-Studien sein, indem Patienten mit bereits vorliegendem RED-S untersucht werden und mit nicht erkrankten Athleten verglichen werden. Das könnte den Vorteil haben, dass auch Langzeitfolgen einer niedrigen Energieverfügbarkeit zu entdecken sind. Es stellt sich hierbei die Frage nach Diagnosekriterien von RED-S bei Männern. Auch ethischen Gründe und Ressourcenverfügbarkeit stehen hier im Vordergrund und sollten nicht missachtet werden.

4.3.3 Drop-out Rate

Während bei drei Studien keine Drop-out Rate genannt ist (Degoutte, et al., 2006; Koehler, et al., 2016; Lane, et al., 2021), schwankt in den anderen Studien die Rate zwischen 10 % (Karila, et al., 2008) und ca. 54 % (Murphy & Koehler, 2020). Ein Grund für den Ausschluss einzelner Kandidaten war die mangelnde Einhaltung des Studienverfahrens. Bei Koehler, et al. (2016) und Murphy und Koehler (2020) fielen über die Hälfte der Teilnehmer raus, da sie nur eine von vier Konditionen durchhielten. Das könnte ein Indikator dafür sein, dass die Teilnehmer komplett gesund waren und mit den Einschränkungen in ihrer Leistungsfähigkeit nicht zurechtkamen. Interessant wäre hier ebenfalls, männliche Athleten mit bereits vorliegendem RED-S zu untersuchen. Eine hohe Drop-out Rate hat zur Folge, dass sich die kleine Stichprobengröße noch weiter verringert und sich die Aussagekraft der Ergebnisse ebenfalls reduziert. Eine Art Trainingslager während der Intervention könnte eine Möglichkeit sein, bessere kontrollierte Bedingungen zu schaffen, was wiederum sehr kosten- und zeitintensiv ist. Für zukünftige Studien sollte eine gute Unterstützung während der Intervention vorliegen. Mithilfe detaillierter Informationsübermittlung und Beistand bei den Ernährungsempfehlungen sowie Laboruntersuchungen, könnte die Drop-out Rate reduziert werden.

4.3.4 Limitationen

Wie bereits erwähnt, lag in allen Studien eine relativ kleine Stichprobengröße und kurze Interventionslängen vor, was das Risiko für Verzerrungen vergrößert und außerdem das Risiko birgt, dass mögliche Veränderungen nicht angemessen festgehalten werden können. In drei von neun Studien lagen keine randomisierten und kontrollierten Bedingungen vor, weshalb diese Studien eine geringere Evidenzlage haben. Moore, et al. (2021) und Lane, et al. (2021) führten jeweils eine Querschnittsstudie durch. Dabei wäre das Vorliegen einer Kontrollgruppe sinnvoll, um die Daten aussagekräftiger zu machen, da die Unterschiede zwischen den Gruppen besser deutlich werden. Cross-Over-Studien minimieren die interindividuellen Unterschiede (Kojima, et al., 2020), was bei fünf von neun Studien der Fall war.

Zudem ist die Berechnung der geringen Energieverfügbarkeit oft mit Fehlern behaftet. Die Energiezufuhr wurde in mehreren Studien selbst von den Teilnehmer*innen dokumentiert, wobei nicht komplett nachvollziehbar ist, ob auch alle Angaben wahrheitsgemäß und genau sind. Gleichmaßen sind auch die Messungen und Berechnungen für den Energieverbrauch im Training und der Ruhestoffwechselrate nicht immer genau oder fehlerfrei und zudem sehr individuell zu betrachten, da diese abhängig von der Anthropometrie sind. Lane, et al. (2020), Moore, et al. (2021) und Papageorgiou et, al. (2017) verwendeten den VO_{2max} -Test, welcher eine höhere Genauigkeit aufweist als die Berechnung mit dem PAL-Wert, welcher bei Koehler, et al. (2016) verwendet wurde. Auch für die Messungen der Körperzusammensetzung wurden verschiedene Verfahren verwendet. Die DXA-Messung wurde in fünf Studien verwendet, wobei in Moore, et al. (2021) eine mechanische Einschränkung auftrat, weshalb einige Messungen nicht zur Verfügung standen (Moore, et al., 2021). Bei Degoutte, et al. (2006) und Karila, et al. (2008) wurde der Begriff der geringen Energieverfügbarkeit nicht definiert, weshalb sich der Vergleich zu anderen Studien als schwieriger gestaltete und falsche Schlüsse gezogen werden können. Bei Kojima, et al. (2020), lag eine niedrigere Trainingsintensität vor als im normalen Training, weshalb es zu einer Unterschätzung der Ergebnisse kommen kann. Auch die hohe Variabilität der Teilnehmer kann zu falschen Interpretationen führen. Bei Lane, et al. (2021) lag das Alter der Probanden zwischen 21 und 70 Jahren, was einige Zusammenhänge in den Messungen beeinflussen kann (Lane, et al., 2021). Beispielsweise auch natürlicherweise geringere Testosteronspiegel im Alter. Moore, et al. (2021) merkten an, dass durch den breiten normativen Bereich von Testosteron ggf. falsche Schlüsse gezogen werden und speziell für männliche Sportler, für verschiedene Sportarten, ein Normbereich festgelegt werden sollte (Moore, et al., 2021).

5. Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser systematischen Literaturrecherche wurden verschiedene Parameter der Gesundheit bei männlichen Sportlern betrachtet. Die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf die Gesundheit männlicher Athleten ist noch nicht ausreichend erforscht. Da das Konzept der Energieverfügbarkeit ursprünglich aufgrund von Auffälligkeiten bei weiblichen Athletinnen entstand, gibt es dementsprechend mehr Literatur zu den Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit bei Frauen. Trotzdem deuten einige Ergebnisse darauf hin, dass es auch bei Männern zu Beeinträchtigungen kommen kann. In dieser Arbeit konnten nur einige Parameter beleuchtet werden, da der Begriff „Gesundheit“ breit aufgestellt ist. Die ausgewählten Studien miteinander zu vergleichen ist aufgrund der Variabilität der Teilnehmer und der unterschiedlichen Parameter schwierig. Außerdem werden auch verschiedene Sportarten ausgeübt, was die Vergleichbarkeit der Studien ebenfalls einschränkt. Die Unterschiede haben einen Einfluss auf die Ergebnisse, da die ausgeübte Sportart auch Auswirkungen auf die Gesundheit und den Körper der Athleten hat. Beispielsweise unterscheiden sich die Ergebnisse bei Krafttraining und Ausdauertraining. Trotz weiterer Überschreitung des „Grenzwertes“ einer niedrigen Energieverfügbarkeit konnten nur vereinzelt Veränderungen der Fortpflanzungs- und Stoffwechselhormone und Knochenumsatzmarker beobachtet werden. Unter anderem waren die Studieninterventionslängen zu kurz, um Veränderungen in diesen langfristigen Prozessen abzubilden. Es wurden teilweise Abnahmen von Insulin, Leptin, IGF-1 und Testosteron in mehreren Studien beobachtet. In jeweils einer Studie konnten eine Zunahme von Cortisol, CTX und Sclerostin und eine Abnahme von P1NP und LH festgestellt werden, während zu T3 keine signifikanten Ergebnisse vorlagen. Die Ergebnisse sind sehr heterogen, was eine ganzheitliche Aussage über die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit erschwert. Eine Abnahme des Körpergewichts, Körperfetts und der FFM durch eine geringe Energieverfügbarkeit wurde hingegen bei den meisten Studien festgestellt. Dies deutet auf ein vorliegendes Energiedefizit hin. Die Vielschichtigkeit und auch die Unterschiede zwischen den Geschlechtern deutet darauf hin, dass Männer unempfindlicher gegenüber einer niedrigen Energieverfügbarkeit sind als Frauen. Die genauen Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf die untersuchten Parameter sind jedoch unklar. Künftige Forschung sollte sowohl die Knochenumsatzmarker als auch die Fortpflanzungs- und Stoffwechselhormone genauer untersuchen, um Veränderungen bewerten zu können. Weitere Untersuchungen zur männlichen Hypothalamus-Hypophysen-Gonadal-Achse sollten durchgeführt werden, um den dahintersteckenden Prozess und die Auswirkungen einer geringen Energieverfügbarkeit auf die Fortpflanzungsfunktion zu verstehen. Außerdem sollte ein einheitlicher Wert für eine geringe Energieverfügbarkeit festgelegt und damit auch standardisierte Messungen bei männlichen Sportlern durchgeführt werden, um Konsistenz zu gewährleisten. Um in Zukunft das Risiko einer geringen Energieverfügbarkeit bei männlichen Sportlern genauer beurteilen zu können, sollten langfristige Studien mit einer geringen Energieverfügbarkeit durchgeführt werden, solange diese ethisch vertretbar sind.

Literaturverzeichnis

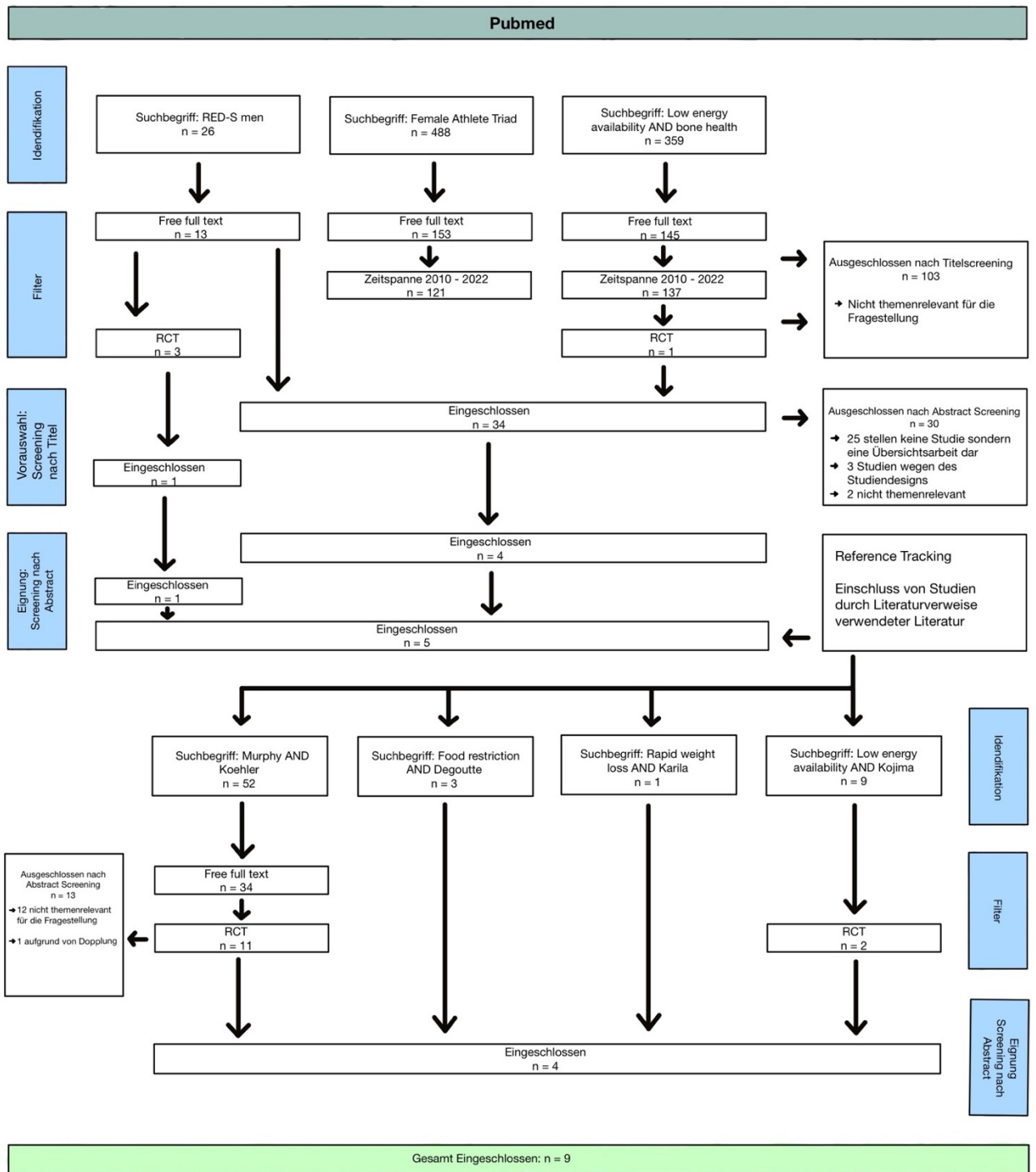
- Arafat, A. (2016). 401e Erkrankungen des Hypophysenvorderlappens und des Hypothalamus. In N. Suttorp, M. Möckel, B. Siegmund, & M. Dietel, *Harrisons Innere Medizin* (S. 401e-1-401e-5) (19. Auflage). Berlin: ABW Wissenschaftsverlag.
- Areta, J. L., Taylor, H. L., & Koehler, K. (2021). Low energy availability: history, definition and evidence of its endocrine, metabolic and physiological effects in prospective studies in females and males. *European Journal of Applied Physiology*, *121*, S. 1-21.
doi:10.1007/s00421-020-04516-0
- Braun, H., Carlsohn, A., Großhauser, M., König, D., Lampen, A., Mosler, S., . . . Hesecker, H. (2019). Energiebedarf im Sport: Position der Arbeitsgruppe Sporternährung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e.V. (DGE). *Ernährungs-Umschau*, *66*(8), S. 146-153.
doi:10.4455/eu.2019.040
- Carlsohn, A. (2020). Relatives Energiedefizit im Sport (RED-S). *Sportphysio*, *8*, S. 59-66.
doi:10.1055/a-1130-9563
- De Souza, M. J., Koltun, K. J., & Williams, N. I. (2019). The Role of Energy Availability in Reproductive Function in the Female Athlete Triad and Extension of its Effects to Men: An Initial Working Model of a Similar Syndrome in Male Athletes. *Sports Medicine*, *49*(Suppl. 2), S. 125-137. doi:10.1007/s40279-019-01217-3
- Degoutte, F., Jouanel, P., Bégue, R. J., Colombier, M., Lac, G., Peguignot, J. M., & Filaire, E. (2006). Food Restriction, Performance, Biochemical, Psychological, and Endocrine Changes in Judo Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, *27*, S. 9-18.
doi:10.1055/s-2005-837505
- Elliott-Sale, K. J., Tenforde, A. S., Parziale, A. L., Holtzman, B., & Ackerman, K. E. (2018). Endocrine Effects of Relative Energy Deficiency in Sport. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, *28*(4), S. 335-349. doi:10.1123/ijsnem.2018-0127
- Fagerberg, P. (2018). Negative Consequences of Low Energy Availability in Natural Male Bodybuilding: A Review. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, *28*, S. 385-402. doi:10.1123/ijsnem.2016-0332
- Goolsby, M. A., & Boniquit, N. (2017). Bone Health in Athletes: The Role of Exercise, Nutrition, and Hormones. *Sports Health*, *9*(2), S. 108-117. doi:10.1177/1941738116677732
- Hackney, A. C., Fahrner, C. L., & Stupnicki, R. (1997). Reproductive hormonal responses to maximal exercise in endurance-trained men with low resting testosterone levels. *Experimental and Clinical Endocrinology & Diabetes*, *105*(5), S. 291-295. doi:10.1055/s-0029-1211767
- Heger, S. (2010). Hypothalamus und Hypophyse. In O. Hiort, T. Danne, & M. Wabitsch, *Pädiatrische Endokrinologie und Diabetologie* (S. 311–327). Berlin, Heidelberg: Springer.

- Held, U. (2010). Welche Arten von Studiendesigns gibt es und wie werden sie korrekt eingesetzt? *Swiss Medical Forum*, 10(41), S. 712-714. doi:10.4414/smf.2010.07304
- Hind, K., Truscott, J. G., & Evans, J. A. (2006). Low lumbar spine bone mineral density in both male and female endurance runners. *Bone*, 39(4), S. 880-885. doi:10.1016/j.bone.2006.03.012
- Köhrle, J., Schomburg, L., & Schweizer, U. (2014). Hormone des Hypothalamus und der Hypophyse. In P. Heinrich, M. Müller, & L. Graeve, *Löffler/Petrides Biochemie und Pathobiochemie* (S. 483–494). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Karila, T. A., Sarkkinen, P., Marttinen, M., Seppälä, T., Mero, A., & Tallroth, K. (2008). Rapid Weight Loss Decreases Serum Testosterone. *International Journal of Sports Medicine*, 29, S. 872-877. doi:10.1055/s-2008-1038604
- Koehler, K., Hoerner, N. R., Gibbs, J. C., Zinner, C., Braun, H., De Souza, M. J., & Schaefer, W. (2016). Low energy availability in exercising men is associated with reduced leptin and insulin but not with changes in other metabolic hormones. *Journal of Sports Sciences*, 34(20), S. 1921-1929. doi:10.1080/02640414.2016.1142109
- Kojima, C., Ishibashi, A., Tanabe, Y., Iwayama, K., Kamei, A., Takahashi, H., & Goto, K. (2020). Muscle Glycogen Content during Endurance Training under Low Energy Availability. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 52(1), S. 187-195. doi:10.1249/MSS.0000000000002098
- Lane, A. R., Hackney, A. C., Smith-Ryan, A. E., Kucera, K., Register-Mihalik, J. K., & Ondrak, K. (2021). Energy Availability and RED-S Risk Factors in Competitive, Non-elite Male Endurance Athletes. *Translational Medicine and Exercise Prescription*, 1(1), S. 25-32. doi:10.53941/tmed.v1i1.29
- Logue, D. M., Madigan, S. M., Melin, A., Delahunt, E., Heinen, M., Mc Donnell, S.-J., & Corish, C. A. (2020). Low Energy Availability in Athletes 2020: An Updated Narrative Review of Prevalence, Risk, Within-Day Energy Balance, Knowledge, and Impact on Sports Performance. *Nutrients*, 12(3):835. doi:10.3390/nu12030835
- Loucks, A. B., & Callister, R. (1993). Induction and prevention of low-T3 syndrome in exercising women. *American Journal of Physiology*, 264, S. 924-930. doi:10.1152/ajpregu.1993.264.5.R924
- Moore, E. M., Drenowatz, C., Stodden, D. F., Pritchett, K., Brodrick, T. C., Williams, B. T., . . . Torres-McGehee, T. M. (2021). Examination of Athlete Triad Symptoms Among Endurance-Trained Male Athletes: A Field Study. *Frontiers in Nutrition*, 26(8):727777. doi:10.3389/fnut.2021.737777
- Mountjoy, M., Sundgot-Borgen, J., Burke, L., Ackermann, K. E., Blauwet, C., Constantini, N., . . . Budgett, R. (2018). International Olympic Committee (IOC) Consensus Statement on

- Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S): 2018 Update. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 28(4), S. 316-331. doi:10.1123/ijsnem.2018-0136
- Mountjoy, M., Sundgot-Borgen, J., Burke, L., Carter, S., Constantini, N., Lebrun, C., . . . Ljungqvist, A. (2014). The IOC consensus statement: beyond the Female Athlete Triad - Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S). *British Journal of Sports Medicine*, 48, S. 491-497. doi:10.1136/bjsports-2014-093502
- Murphy, C., & Koehler, K. (2020). Caloric restriction induces anabolic resistance to resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 120, S. 1155–1164. doi:10.1007/s00421-020-04354-0
- Murphy, C., Bilek, L. D., & Koehler, K. (2021). Low Energy Availability with and without High-Protein Diet Suppresses Bone Formation and Increases Bone Resorption in Men: A Randomized Controlled Pilot Study. *Nutrients*, 13(3):802. doi:10.3390/nu13030802
- Obermayer-Pietsch, B., & Schwetz, V. (2016). Biochemische Marker des Knochenstoffwechsels und ihre Bedeutung. *Zeitschrift für Rheumatologie*, 75, S. 451–458. doi:10.1007/s00393-016-0083-5
- Otis, C. L., Drinkwater, B., Johnson, M., Loucks, A., & Wilmore, J. (1997). American College of Sports Medicine Position Stand: The Female Athlete Triad. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(5), S. 1-9. doi:10.1097/00005768-199705000-00037
- Papageorgiou, M., Elliott-Sale, K. J., Parsons, A., Tang, J. C., Greeves, J. P., Fraser, W. D., & Sale, C. (2017). Effects of reduced energy availability on bone metabolism in women and men. *Bone - Official Journal of the International Bone and Mineral Society*, 105, S. 191-199. doi:10.1016/j.bone.2017.08.109
- Roth, D., Egli, C. M., Kriemler, S., Birkhäuser, M., Jaeger, P., Imhof, U., . . . Marti, B. (2000). Female Athlete Triad. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 48(3), S. 119-132.
- Sale, C., & Elliott-Sale, K. J. (2019). Nutrition and Athlete Bone Health. *Sports Medicine*, 49(Suppl 2), S. 139-151. doi:10.1007/s40279-019-01161-2
- World Health Organization. (1994). Assessment of fracture risk and its application to screening for postmenopausal osteoporosis : report of a WHO study group [meeting held in Rome from 22 to 25 June 1992]. WHO Technical Report Series; 843. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/39142>

Anhang

I. Flow-Chart



II. PICOR-Tabelle

Problem	Intervention	Control	Outcome	Results
Degoutte, F., Jouanel, P., Bégué, R. J., Colombier, M., Lac, G., Peguignot, J. M., & Filaire, E. (2006). Food Restriction, Performance, Biochemical, Psychological, and Endocrine Changes in Judo Athletes. <i>International Journal of Sports Medicine</i> , 27, S. 9-18. doi:10.1055/s-2005-837505				
Untersuchung der Auswirkungen einer einschränken- den Energie- und Flüssig- keitszufuhr auf die Physiolo- gie, Psyche und körperli- che Leistungs- fähigkeit bei Judo Sportlern.	n = 20 männliche Judo-Athleten, Dauer: sieben Tage	Randomisierte Kontrollstudie Kontrollgruppe n = 10	Messung der Kör- perzusammenset- zung, Leistungstests, Blutproben, Bewer- tung der Stimmung, Bestimmung der me- tabolischen und hor- monalen Reaktio- nen, 7-tägiges Er- nährungsprotokoll	Verringerung des Gewichts, Körperfett, fettfreie Masse, Testosteron und Insulin, Erhöhung der Cortisol-Kon- zentration,
Karila, T. A., Sarkkinen, P., Marttinen, M., Seppälä, T., Mero, A., & Tallroth, K. (2008). Rapid Weight Loss Decreases Serum Testosterone. <i>International Journal of Sports Medicine</i> , 29, S. 872-877. doi:10.1055/s-2008-1038604				
Untersuchung der Auswir- kungen einer schnellen Ge- wichtsreduk- tion bei Elite Wrestlern	n = 18 männliche Elite-Wrestler, Dauer: 2 – 3 Wochen	Interventionsstu- die	DXA-Messung für Körpermasse, Fett- anteil, fettfreie Kör- permasse, Fett- masse, Knochen- masse und Knochen- mineraldichte, Blut- proben zur Bestim- mung des Gesamt- testosterons, luteini- sierendes Hormon (LH), insulinähnli- cher Wachstums- faktor (IGF1) und	Verringerung des Körperge- wichts, Körper- fetts, fettfreien Masse, Testos- teron und LH, Knochenmasse und Knochen- mineraldichte unverändert

			sex-hormone-binding globulin (SHBG)	
<p>Koehler, K., Hoerner, N. R., Gibbs, J. C., Zinner, C., Braun, H., De Souza, M. J., & Schaenzer, W. (2016). Low energy availability in exercising men is associated with reduced leptin and insulin but not with changes in other metabolic hormones. <i>Journal of Sports Sciences</i>, 34(20), S. 1921-1929. doi:10.1080/02640414.2016.1142109</p>				
Untersuchung endokriner Effekte einer geringen Energieverfügbarkeit bei trainierenden Männern	n = 6 Sporttreibende Männer, Dauer: vier Tage pro Kon-dition (4 x 4)	Kontrollierte Cross-Over-Studie mit wiederholten Messungen Zwei Kontrollgruppen n = 6	Ernährungsinterview (Häufigkeit und Menge der Mahlzeiten und Getränke), BIA-Messung für Körperzusammensetzung und -gewicht, Leistungstest, Bestimmung der Energieverfügbarkeit, Ernährungs- und Trainingsprotokoll, Bestimmung von Hormonen und Metaboliten mittels vollautomatisierten System	Verringerung von Körpergewicht, Körperfett, Insulin und Leptin, keine Veränderungen in T3 und Testosteron
<p>Kojima, C., Ishibashi, A., Tanabe, Y., Iwayama, K., Kamei, A., Takahashi, H., & Goto, K. (2020). Muscle Glycogen Content during Endurance Training under Low Energy Availability. <i>Medicine & Science in Sports & Exercise</i>, 52(1), S. 187-195. doi:10.1249/MSS.0000000000002098</p>				
Untersuchung der Auswirkungen eines Ausdauertrainings unter einer geringen Energieverfügbarkeit, auf	n = 7 männliche Ausdauerläufer, Dauer: drei Tage pro Kon-dition (2 x 3)	Randomisierte, kontrollierte Cross-Over-Studie Kontrollgruppe n = 7	BIA-Messung für Körpergewicht, Muskelvolumen und fettfreie Masse, Bestimmung des Muskelglykogengehalts und Messung	Verringerung von Körpergewicht, fettfreien Masse, IGF-1 und Testosteron

den Glykogen- gehalt der Muskeln, die Marker für Muskelschä- den, die endo- krine Regulie- rung und die Ausdauerleis- tung bei männ- lichen Läufern			der Atemgas-, Blut- und Urinwerte	
Lane, A. R., Hackney, A. C., Smith-Ryan, A. E., Kucera, K., Register-Mihalik, J. K., & Ondrak, K. (2021). Energy Availability and RED-S Risk Factors in Competitive, Non-elite Male Endurance Athletes. <i>Translational Medicine and Exercise Prescription</i> , 1(1), S. 25-32. doi:10.53941/tmed.vlil.29				
Untersuchung der Energie- verfügbarkeit und Risikofak- toren für RED- S und ihr Zu- sammenhang mit nicht elitä- ren männlichen Ausdauersport- lern	n = 60 männliche Aus- dauersportler (27 Läufer, 21 Fahrradfahrer, sieben Triathle- ten, fünf wei- tere Sportler), Dauer: sieben Tage	Beobachtete Querschnittsstudie	DXA-Messung für Körperzusammen- setzung und Kno- chenmineraldichte, Ernährungs- und Trainingsprotokoll, Blutproben	Negative Kor- relation zwi- schen Energie- verfügbarkeit und Knochen- mineraldichte, Keine weiteren Veränderungen in hormonellen oder Knochen- markern fest- gestellt
Moore, E. M., Drenowatz, C., Stodden, D. F., Pritchett, K., Brodrick, T. C., Williams, B. T., . . . Torres-McGehee, T. M. (2021). Examination of Athlete Triad Symptoms Among Endurance-Trained Male Athletes: A Field Study. <i>Frontiers in Nutrition</i> , 26(8):727777. doi:10.3389/fnut.2021.737777				
Untersuchung der Kompo- nenten der männlichen	n = 14 männliche Aus- dauersportler	Querschnittsstudie	DXA-Messung für Körperzusammen- setzung und Kno- chenmineraldichte,	Keiner wies eine niedrige Knochenmine- raldichte auf,

Athleten Triade (male athlete triad) bei männlichen Ausdauersportlern in verschiedenen Trainingsphasen	Dauer: sieben Tage pro Kon-dition (2 x 7)		Ernährungs- und Trainingsprotokoll, Blutproben	keine Veränderungen in gemessenen Parametern
Murphy, C., & Koehler, K. (2020). Caloric restriction induces anabolic resistance to resistance exercise. <i>European Journal of Applied Physiology</i> , 120, S. 1155–1164. doi:10.1007/s00421-020-04354-0				
Untersuchung der anabolen endokrinen Reaktion auf Widerstandstraining während einer Kalorienrestriktion	n = 7 5 Männer und 2 Frauen, Dauer: drei Tage pro Kon-dition (3 x 3)	Randomisierte, kontrollierte einfach verblindete Cross-Over-Studie mit wiederholten Messungen Kontrollgruppe n = 7	DXA-Messung für Körpergewicht und -zusammensetzung, Blutproben zur Bestimmung von Knochenmarkern	Verringerung in Körpergewicht, Körperfett und fettfreie Masse, IGF-1, Zunahme an Sclerostin vor dem Training, Wiederherstellung nach dem Training
Murphy, C., Bilek, L. D., & Koehler, K. (2021). Low Energy Availability with and without High-Protein Diet Suppresses Bone Formation and Increases Bone Resorption in Men: A Randomized Controlled Pilot Study. <i>Nutrients</i> , 13(3):802. doi:10.3390/nu13030802				
Untersuchung einer geringen Energieverfügbarkeit in Kombination mit einer geringen Proteinzufuhr auf die	N = 7 Männer, Dauer: fünf Tage pro Kon-dition (3 x 5)	Randomisierte, kontrollierte, einfach verblindete Cross-Over-Pilotstudie mit wiederholten Messungen Kontrollgruppe = 7	BIA-Messung für Körperzusammensetzung, Ernährung bestand aus vorgeschriebenen Produkten, Blutproben zur Bestimmung von Knochenmarkern	Abnahme von Körpergewicht, Körperfett, fettfreie Masse, Leptin und P1NP, Zunahme an CTX

Knochen- gesundheit.				
Papageorgiou, M., Elliott-Sale, K. J., Parsons, A., Tang, J. C., Greeves, J. P., Fraser, W. D., & Sale, C. (2017). Effects of reduced energy availability on bone metabolism in women and men. <i>Bone - Official Journal of the International Bone and Mineral Society</i> , 105, S. 191-199. doi:10.1016/j.bone.2017.08.109				
Untersuchung der Auswir- kungen einer geringen Ener- gieverfügbar- keit auf Kno- chenmarker bei Frauen und Männern um die Unter- schiede zwi- schen den Ge- schlechtern zu vergleichen	n = 22 elf Frauen und elf Männer, Dauer: neun Tage pro Kon- dition (2 x 9)	Randomisierte, kontrollierte Cross-Over-Stu- die Kontrollgruppe n = 22	DXA-Messung, Er- nährungsplan mit festgelegten Menüs, Leistungstest, Blut- proben, biochemi- sche Analysen	Abnahme des Körperge- wichts, keine signifikanten hormonellen Veränderungen oder Verände- rungen der Knochenmar- ker

III. Eidesstattliche Erklärung

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

.....

Datum

.....

Unterschrift