

Medizinische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

**Evaluierung des Einflusses essenzieller Aminosäuren auf
Parameter der Körperzusammensetzung, der Kraft- und
Ausdauerleistung**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Medizin (Dr. med.)

vorgelegt

der Medizinischen Fakultät

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Philipp Thieke

geboren am 16.09.1989 in Gardelegen

Betreuer: 1. Prof. Dr. med. Karl-Stefan Delank

2. apl. Prof. Dr. phil. René Schwesig

Gutachter: 1. Frau Prof. G. Stangl

2. PD W. Laube (Altach)

03.03.2020

12.10.2020

Referat

Die Zielstellung dieser Arbeit war es, zu untersuchen, ob die Leistungsentwicklung und die körperlichen Adaptionsprozesse bei Ausdauer- und Kraftausdauertraining durch essenzielle Aminosäuren positiv beeinflusst werden können. Zu diesem Zweck absolvierten 44 männliche Probanden ($26,1 \pm 3,8$ Jahre) über einen Zeitraum von 6 Wochen dreimal wöchentlich ein für die Ausdauer- und Kraftausdauerentwicklung konzipiertes Training. Sie wurden vor Trainingsbeginn durch Randomisierung in eine Interventions- und Kontrollgruppe unterteilt. Die Interventionsgruppe erhielt an Trainingstagen das aus essenziellen Aminosäuren bestehende Präparat Amino4U®. Die Kontrollgruppe erhielt ein optisch identisches Präparat aus Cellulose. Die Vergabe erfolgte unter doppelter Verblindung. Zur Untersuchung der Anpassungsprozesse wurden die Körperzusammensetzung, die Maximalkraft, das Kraftausdauer- und Ausdauerleistungsvermögen vor und nach Beendigung der Trainingsphase gemessen. Stellvertretend für die Körperzusammensetzung wurden die Parameter fettfreie Masse (kg), Gewicht (kg), Wasseranteil (%) und Körperfettanteil (%) mittels bioelektrischer Impedanzanalyse untersucht. Die Ausdauerleistung wurde anhand Physical Working Capacity₁₇₀ (W/kg) sowie der Ruhe- und Erholungsherzfrequenz am Radergometer beurteilt. Maximalkraft und Kraftausdauer wurden durch 1-RM (1-Wiederholung Maximalkraft) und die maximal mögliche Anzahl an Wiederholungen bei 60 %/1-RM an den Übungen Bankdrücken, Latzug und Beinpresse gemessen. Hinsichtlich der konstitutionellen Parameter konnten keine signifikanten Interaktionseffekte festgestellt werden. Ein signifikanter Interaktionseffekt wurde bei der Maximalkraft der Übung Beinpresse beobachtet. Die Interventionsgruppe zeigte tendenziell auch größere Maximalkraftzunahmen in den Übungen Latzug und Bankdrücken, ohne ein signifikantes Niveau zu erreichen. Die Ergebnisse der Arbeit bestätigen teilweise die Beobachtung anderer Forschungsarbeiten, dass essenzielle Aminosäuren und Proteine die Entwicklung von maximaler Kraftentfaltung bei wiederholt auftretenden Krafttrainingsreizen unterstützen können. Die Ausdauer- und Kraftausdauerleistung wurden durch die Aufnahme von essenziellen Aminosäuren in der Interventionsgruppe gegenüber der Kontrollgruppe nicht signifikant erhöht. Tendenziell zeigten die Probanden der Interventionsgruppe geringere Leistungszunahmen als die Kontrollgruppe. Die Aufnahme von essenziellen Aminosäuren zusätzlich zur gewohnten Mischkost ist zur Optimierung von Adaptionsmechanismen an Kraftausdauer- und Ausdauertraining anhand dieser Ergebnisse nicht zu empfehlen.

Thieke, Philipp: Evaluierung des Einflusses essenzieller Aminosäuren auf Parameter der Körperzusammensetzung, der Kraft- und Ausdauerleistung, Halle (Saale), Univ., Med. Fak., Diss., 80 Seiten, Erscheinungsjahr 2020

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG – BIOCHEMISCHER UND KLINISCHER HINTERGRUND DER STUDIE	- 1 -
1.1	AMINOSÄUREN – EINE EINFÜHRUNG	- 1 -
1.2	TÄGLICHER BEDARF AN PROTEINEN UND AMINOSÄUREN	- 3 -
1.3	PROTEIN- UND AMINOSÄURENMETABOLISMUS DER SKELETTMUSKULATUR.....	- 5 -
1.4	OPTIMALER ZEITPUNKT EINER PROTEIN- UND AMINOSÄURENAUFNAHME ZUR STIMULATION DER MUSKELPROTEINSYNTHESE	- 11 -
1.5	GESUNDHEITLICHE AUSWIRKUNGEN EINER ERHÖHTEN PROTEINAUFNAHME	- 12 -
1.6	WIRKSAMKEIT VON AMINOSÄUREN- UND PROTEINSUPPLEMENTIERUNG AUF FUNKTIONELLE PARAMETER	- 14 -
2	ZIELSTELLUNG	- 19 -
3	MATERIAL UND METHODIK.....	- 21 -
3.1	PROBANDENKOLLEKTIV UND ANTHROPOMETRISCHE DATEN.....	- 21 -
3.2	STUDIENDESIGN.....	- 24 -
3.3	TRAININGSPLAN.....	- 27 -
3.4	MESSUNG DER KÖRPERZUSAMMENSETZUNG.....	- 30 -
3.5	MESSUNG DER AUSDAUERLEISTUNGSFÄHIGKEIT	- 33 -
3.6	MESSUNG DER MAXIMALKRAFT UND DER KRAFTAUSDAUER	- 37 -
3.7	STATISTISCHE ANALYSE	- 41 -
4	ERGEBNISSE	- 42 -
4.1	KÖRPERZUSAMMENSETZUNG	- 42 -
4.2	AUSDAUERLEISTUNGSFÄHIGKEIT	- 43 -
4.3	MAXIMALKRAFT	- 43 -
4.4	KRAFTAUSDAUER	- 44 -
5	DISKUSSION	- 46 -
5.1	METHODENDISKUSSION UND LIMITATIONEN	- 46 -
5.2	ERGEBNISDISKUSSION UND LIMITATIONEN	- 52 -
6	ZUSAMMENFASSUNG	- 65 -
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	- 67 -
8	THESEN	- 76 -
9	ANLAGE	- 77 -

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
1-RM	one-repetition maximum
Abb.	Abbildung
AS	Aminosäuren
ATP	Adenosintriphosphat
BCAA	branched-chain amino acids
BIA	bioelektrische Impedanzanalyse
bpm	beats per minute
cm	Zentimeter
d	Tag
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung
EAA	essential amino acids
FFM	fettfreie Masse
g	Gramm
GFR	glomeruläre Filtrationsrate
Hf_{max}	maximale Herzfrequenz
ISSN	International Society of Sports Nutrition
kcal	Kilokalorien
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht

max.	maximal
min.	minimal
min	Minute
MPB	muscle protein breakdown
MPS	muscle protein synthesis
MZP	Messzeitpunkt
NEAA	non-essential amino acids
PWC	Physical Working Capacity
s	Sekunde
SD	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
U/min	Umdrehungen je Minute
V	Volumen
VO_{2max}	maximale Sauerstoffaufnahmekapazität
W	Watt
WHO	World Health Organization
ρ	Resistivität

Tabellenverzeichnis

TAB. 1 – EMPFOHLENE AUFNAHMEMENGE ESSENZIELLER AMINOSÄUREN DER WHO PRO TAG UND PRO GRAMM AUFGENOMMENEN PROTEINEN (MODIFIZIERT NACH WHO/FAO/UNU 2007).....	- 2 -
TAB. 2 – ANTHROPOMETRISCHE DATEN DES PROBANDENKOLLEKTIVS I (N = 38)	- 22 -
TAB. 3 – ANTHROPOMETRISCHE DATEN DES PROBANDENKOLLEKTIVS II (N = 38)	- 22 -
TAB. 4 – ÜBERBLICK ÜBER GRUPPENZUORDNUNG UND ANZAHL (N) EINGENOMMENER ‚AMINO4U®‘-TABLETTEN ANHAND DER FFM.....	- 26 -
TAB. 5 – DESKRIPTIVE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE SOWIE VARIANZANALYSE ÜBER DIE PARAMETER DER KÖRPERZUSAMMENSETZUNG IN DER AMINOGRUPPE (N = 16) UND PLACEBOGRUPPE (N = 16 BZW. 17) NACH KONSISTENZ- UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG.	- 42 -
TAB. 6 – DESKRIPTIVE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE SOWIE VARIANZANALYSE ÜBER PARAMETER DER AUSDAUERLEISTUNGSFÄHIGKEIT IN DER AMINOGRUPPE (N = 15 BZW. 14) UND PLACEBOGRUPPE (N = 18 BZW. 15) NACH KONSISTENZ- UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG.....	- 43 -
TAB. 7 – DESKRIPTIVE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE SOWIE VARIANZANALYSE ÜBER PARAMETER DER MAXIMALKRAFT IN DER AMINOGRUPPE (N = 15 BZW. 18) UND PLACEBOGRUPPE (N = 17 BZW. 18 BZW. 20) NACH KONSISTENZ- UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG.....	- 44 -
TAB. 8 – DESKRIPTIVE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE SOWIE VARIANZANALYSE ÜBER PARAMETER DER KRAFTAUSDAUER IN DER AMINOGRUPPE (N = 14 BZW. 13) UND PLACEBOGRUPPE (N = 17 BZW. 16 BZW. 14) NACH KONSISTENZ- UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG.....	- 46 -
TAB. 9 – DESKRIPTIVE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE SOWIE VARIANZANALYSE ÜBER PARAMETER TONNAGE IN DER AMINOGRUPPE (N = 15 BZW. 13) UND PLACEBOGRUPPE (N = 16 BZW. 13) NACH KONSISTENZ- UND PLAUSIBILITÄTSPRÜFUNG.	- 46 -

Abbildungsverzeichnis

ABB. 1 – STRUKTURFORMEL DER AMINOSÄUREN MIT DEM SPEZIFISCHEN REST R (MODIFIZIERT NACH RASSOW 2016B)	- 1 -
ABB. 2 – SCHEMATISCHER ABLAUF DES MENSCHLICHEN AMINOSÄUREN- UND PROTEINMETABOLISMUS (MODIFIZIERT NACH WHO/FAO/UNU (2007))	- 5 -
ABB. 3 – NETTO-MUSKELPROTEINSYNTHESE IM RUHEZUSTAND UND 3H, 24 H SOWIE 48 H NACH EINER ISOLIERTEN KRAFTTRAININGSEINHEIT OHNE ZUFUHR ESSENZIELLER AMINOSÄUREN (MODIFIZIERT UND ÜBERSETZT NACH PHILLIPS ET AL., 1997)	- 8 -
ABB. 4 – VERHÄLTNIS ZWISCHEN ARTERIELLEM BLUTFLUSS ALS VIELFACHES DER BASALEN DURCHBLUTUNGSRATE UND DER FRAKTIONIERTEN MUSKELPROTEINSYNTHESE (MODIFIZIERT UND ÜBERSETZT NACH BIOLO ET AL., 1997).....	- 9 -
ABB. 5 – MAXIMALE RELATIVE ZUNAHME DER MUSKELPROTEINSYNTHESE UND SYNERGISTISCHER EFFEKT IN ABHÄNGIGKEIT VON EINFLUSSFAKTOREN DER MPS (NACH DATEN VON RASMUSSEN ET AL., 2000) ANMERKUNG: ZAHLENWERTE DURCH RASMUSSEN ET AL. GERUNDET	- 10 -
ABB. 6 – STUDIENDESIGN	- 24 -
ABB. 7 – PRÄPARAT ‚AMINO4U®‘	- 25 -
ABB. 8 – ABLAUFSCHEMA AUSDAUERTRAINING	- 27 -
ABB. 9 – ÜBUNG ‚UNTERARMSTÜTZ‘ ALS ISOMETRISCHE STABILISATIONSÜBUNG	- 28 -
ABB. 10 – ÜBUNG ‚RÜCKENSTRECKER‘ ALS ISOMETRISCHE STABILISATIONSÜBUNG.....	- 28 -
ABB. 11 – ABLAUFSCHEMA KRAFTAUSDAUERTRAININGSPLAN	- 29 -
ABB. 12 DAS KOMPARTIMENT-MODELL DES MENSCHLICHEN KÖRPERS (MODIFIZIERT NACH KYLE ET AL. 2004A).....	- 30 -
ABB. 13 GRUNDANNAHMEN DER BIA (MODIFIZIERT NACH KYLE ET AL. 2012)	- 31 -
ABB. 14 – KÖRPERANALYSESYSTEM ‚TANITA BC-545N‘	- 32 -
ABB. 15 – TESTSITUATION BEI DER MESSUNG DER KÖRPERZUSAMMENSETZUNG	- 32 -
ABB. 16 – ‚H3 HERZFREQUENZSENSOR‘ UND DAZUGEHÖRIGE BEFESTIGUNG MITTELS ‚WEARLINK‘.....	- 35 -
ABB. 17 HERZFREQUENZEMPFÄNGER ‚POLAR RS800CX‘	- 35 -
ABB. 18 PWC ₁₇₀ BELASTUNGSPROTOKOLL (DAUER DER STUFEN JEWEILS 2 MIN).....	- 36 -
ABB. 19 ERWÄRMUNGSSCHEMA MAXIMALKRAFTTESTUNG.....	- 38 -

ABB. 20 – BANKDRÜCKEN UMKEHRPUNKT	- 39 -
ABB. 21 BANKDRÜCKEN AUSGANGSSTELLUNG.....	- 39 -
ABB. 23 LATZUG AUSGANGSSTELLUNG.....	- 40 -
ABB. 22 LATZUG UMKEHRPUNKT	- 40 -
ABB. 24 BEINPRESSE AUSGANGSSTELLUNG.....	- 40 -
ABB. 25 – BEINPRESSE UMKEHRPUNKT	- 40 -

1 Einleitung – biochemischer und klinischer Hintergrund der Studie

1.1 Aminosäuren – eine Einführung

Aminosäuren (AS) sind die Bausteine aller Proteine und damit eine der bedeutsamsten Grundvoraussetzungen jeglichen Lebens auf der Erde. Für die Zusammensetzung der Proteine werden 20 verschiedene proteinogene (für die Proteinbiosynthese verwendete) AS benötigt, aus denen beim Menschen mehr als 100 000 verschiedene Proteine zusammengefügt werden können. Zusätzlich wird die AS Selenocystein von einigen Autoren als 21. proteinogene AS gewertet, wobei diese jedoch nur in einem geringen Teil aller Proteine vorkommt (beim Menschen in 25 der über 100 000) (Höhne, 2011). Neben den proteinogenen AS sind mehr als 400 nicht proteinogene AS (nicht für die Proteinbiosynthese verwendete AS), wie Thyroxin oder Levodopa, bekannt (Nuhn, 1990). Die hohe Bedeutung der Aminosäuren liegt im menschlichen Organismus nicht nur darin begründet, dass sie als Grundbaustein der Proteine fungieren, sondern in einer Vielzahl von lebenswichtigen zusätzlichen Funktionen wie der Energiegewinnung für Stoffwechselprozesse und der Rolle als Grundbaustein einer bedeutenden Anzahl anderer stickstoffhaltiger Moleküle, wie des Glutathions oder der Katecholamine. Bei AS handelt es sich um organische Carbonsäuren, die an ihrem α -Kohlenstoffatom eine Aminogruppe, ein Wasserstoffatom sowie einen die spezifischen Eigenschaften bestimmenden Rest enthalten (Abb. 1) (Rassow, 2016b).

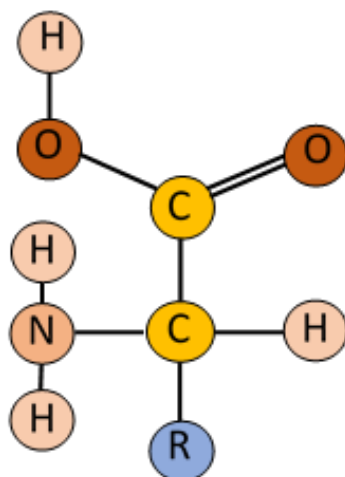


Abb. 1 – Strukturformel der Aminosäuren mit dem spezifischen Rest R (nach Angaben von Rassow 2016b)

Abkürzungen: N (Stickstoffatom), C (Kohlenstoffatom), O (Sauerstoffatom), H (Wasserstoffatom), R (Rest)

Einleitung – biochemischer und klinischer Hintergrund der Studie

Im erwachsenen menschlichen Körper sind ca. 6 bis 12 kg Protein gespeichert (Rassow, 2016a). Die gesamte Proteinmasse ist ein dynamisches System mit kontinuierlichem Auf- und Abbau und mit einer täglichen Umsatzrate von ca. 250 bis 300 g Protein, wobei die quergestreifte Skelettmuskulatur (anteilig bis zu 100 g je Tag) und die Leber (anteilig bis zu 50 g je Tag) eine zentrale Stellung im Protein- und AS-Metabolismus einnehmen (Röhm, 2014). Insgesamt steht der humanen Proteinbiosynthese ein durchschnittliches Substrat von 200 bis 220 g an freien AS im Interstitium, im Blutplasma und im Intrazellularraum zur Verfügung (Wagenmakers, 1998). Durch endogenen Proteinkatabolismus, enteral resorbierte AS sowie eine körpereigene Synthese wird die Menge an freien AS relativ konstant gehalten. Die körpereigene Synthese als Quelle freier AS ist indessen allein nur eingeschränkt in der Lage, die Verfügbarkeit von AS aufrechtzuerhalten, da 8 der 20 proteinogenen AS als essenziell gelten und nicht durch körpereigene Syntheseprozesse bereitgestellt werden können. Daher müssen diese essenziellen AS (EAA = essential amino-acids) zur Deckung des Bedarfes in bestimmten Mindestmengen über die Nahrung zugeführt werden (Tab. 1).

Tab. 1 – Empfohlene Aufnahmemenge essenzieller Aminosäuren der World Health Organization (WHO) pro Tag und pro Gramm aufgenommenen Proteinen (WHO/FAO/UNU (2007))

Essenzielle Aminosäure	Von WHO empfohlene tägliche Aufnahme in	
	mg/kg pro Tag	mg/g Protein
Isoleucin	20	30
Leucin	39	59
Lysine	30	45
Phenylalanin (+Tyrosin)	25	38
Valin	26	39
Threonin	15	23
Tryptophan	4	6
Methionin (+Cystein)	15	22
Gesamtmenge	174	262

Im humanen Metabolismus läuft eine kontinuierliche Degradation von Proteinen ab, die bei Energie- und Nährstoffmangel auf ein Minimum reduziert, aber nicht vollständig unterbunden werden kann. Demzufolge muss der Mensch über seine gesamte Lebensspanne Proteine bzw. AS zwingend zur Aufrechterhaltung, zum Wachstum und zur Wiederherstellung von Körperzellmasse aufnehmen. Als Energieträger sind AS hingegen nicht obligat. In der typischen Ernährung westlicher Industrienationen machen Proteine und AS dennoch ca. 10 bis 15 % des Gesamtenergiegehaltes der Nahrung aus (Hoffer, 2016).

1.2 Täglicher Bedarf an Proteinen und Aminosäuren

Die aktuellen Erkenntnisse über den täglichen Proteinbedarf basieren auf der Stickstoffbilanz des menschlichen Organismus (Hoffer, 2016). Unter dieser wird das Verhältnis zwischen Stickstoffaufnahme über die Nahrung, vornehmlich über Proteine und in geringeren Mengen über freie AS, und der Stickstoffausscheidung, hauptsächlich über den Urin, verstanden. Meist ist die Stickstoffbilanz des Körpers ausgeglichen, d. h. die Aufnahme entspricht der Ausscheidung (Höhne, 2011). Unter bestimmten Umständen verschiebt sie sich jedoch ins Positive oder Negative. Übersteigt die Stickstoffaufnahme die Stickstoffabgabe, so wird dies als positive Stickstoffbilanz bezeichnet und Protein wird netto vom Körper synthetisiert (anaboler Zustand). Dies tritt in Zeiten erhöhter Verfügbarkeit von AS oder Proteinen auf. Bei höherer Stickstoffabgabe als -aufnahme wird dies als negative Stickstoffbilanz bezeichnet und Protein wird netto vom Körper abgebaut (kataboler Zustand), z. B. bei Proteinmangelzuständen oder Krankheit. Dieses Prinzip wird genutzt, um die niedrigste Proteinaufnahme zu bestimmen, bei der der menschliche Metabolismus fähig ist, eine ausgeglichene Stickstoffbilanz aufrecht zu erhalten, und um anabole von katabolen Zuständen zu differenzieren.

In einer 2007 veröffentlichten Erklärung gibt die World Health Organization (WHO) den durchschnittlichen minimalen Proteinbedarf eines gesunden Erwachsenen mit 0,66 g/kg Körpergewicht (KG) täglich an. Um interindividuelle Schwankungen im Proteinbedarf zu berücksichtigen, wird als sicheres Level die 97,5te Perzentile der Populationsverteilung der minimalen Proteinanforderung definiert und mit 0,83 g/kg KG pro Tag angegeben. Daher wird davon ausgegangen, dass die Aufnahme von 0,83 g/kg KG Protein täglich ausreichend für 97,5% der gesunden Erwachsenenpopulation ist (WHO/FAO/UNU, 2007). Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung (DGE) schließt sich mit ihrer Empfehlung von 0,8 g/kg KG/d Proteinaufnahme bei gesunden Erwachsenen den Referenzwerten der WHO an (DGE, 2017).

Die Mindestmenge an Proteinaufnahme definiert die WHO als die Menge, die notwendig ist, um eine ausgeglichene Stickstoffbilanz bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der

Körperzusammensetzung sowie aller metabolischen, physiologischen und psychologischen Prozesse zu gewährleisten. Diese Referenzwerte setzen eine Population voraus, in der alle basalen Anforderungen an die Energieaufnahme wie auch der Bedarf an anderen Mikro- und Makronährstoffen vollständig erfüllt sind. Die WHO legt ihren Empfehlungen für die tägliche Proteinaufnahme ein lediglich moderates Aktivitätsmuster ohne intensivere sportliche Belastungen zugrunde (WHO/FAO/UNU, 2007). Durch vermehrte körperliche Belastung steigt jedoch aufgrund zunehmender Oxidation von AS, sowie ansteigender Degradation von strukturellen und kontraktilen Proteinen der Skelettmuskulatur der tägliche Bedarf an Proteinen und AS. Durch Friedman und Lemon (1989) konnte nachgewiesen werden, dass bei erhöhter körperlicher Belastung die empfohlene Mindestmenge von 0,8 g/kg KG/d nicht ausreichend ist und dass ohne Anpassung der täglichen Proteinaufnahme eine negative Stickstoffbilanz verbleibt. Im Rahmen einer Übersichtsarbeit von Kreider et al. (1993) konnte aufgezeigt werden, dass sowohl beim Krafttraining als auch beim hochintensiven Ausdauertraining (> 50 % der maximalen Sauerstoffkapazität ($\dot{V}O_2\text{max}$)) eine angepasste Proteinaufnahme von mindestens 1,3 bis 1,6 g/kg KG/d zur Aufrechterhaltung einer ausgeglichenen Stickstoffbilanz notwendig ist.

1.3 Protein- und Aminosäurenmetabolismus der Skelettmuskulatur

Die Proteinmasse der quergestreiften Skelettmuskulatur ist einem stetigen Wandel unterworfen, bei dem die Synthese von Muskelprotein (MPS = muscle protein synthesis) und der Abbau von Muskelprotein (MPB = muscle protein breakdown) simultan ablaufen (Wolfe, 2017). Die Skelettmuskulatur nimmt eine zentrale Position im AS- und Proteinmetabolismus des Körpers ein (Abb. 2). Durch alternierende Phasen von Proteinkatabolismus im Zustand des Fastens und postprandialem Proteinanabolismus wird die Stabilität der gesamten Muskelmasse über den Tag verteilt gesichert. Dieser alternierende Ablauf ist nötig, um in Fastenphasen Leber und intestinale Organe mit AS zu versorgen und um den Pool an freien AS aufrechtzuerhalten (Biolo et al., 1994). Der Protein- und AS-Stoffwechsel der Skelettmuskulatur wird vor allem von zwei Faktoren entscheidend beeinflusst: durch die externe Zufuhr von Proteinen und AS und durch körperliche Belastung wie Kraft- und Ausdauertraining.

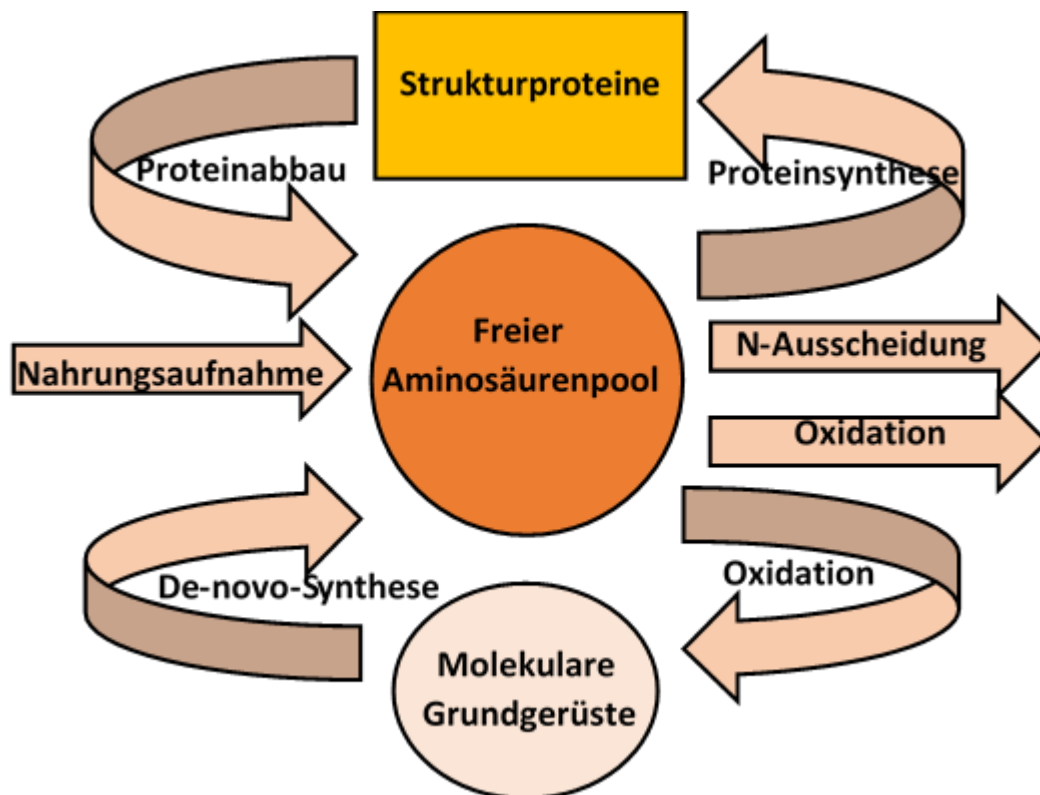


Abb. 2 – Schematischer Ablauf des menschlichen Aminosäuren- und Proteinmetabolismus (modifiziert und übersetzt nach WHO/FAO/UNU (2007), S.14)

Abkürzungen: N-Ausscheidung (Stickstoff-Ausscheidung)

Einfluss von AS und Proteinen

Die bedeutendste Variable für die Initiierung der MPS in der Skelettmuskulatur ist die Verfügbarkeit von AS für den Metabolismus (Bohé et al., 2003). Es konnte bereits mehrfach nachgewiesen werden, dass sowohl nach dem Verzehr einer Protein enthaltenden Mahlzeit mit konsekutiver Hyperaminoazidämie als auch nach direkter venöser Infusion von AS eine gesteigerte Proteinsynthese im Muskelstoffwechsel stattfindet (u. a. Biolo et al., 1997; Bohé et al., 2003; Miller et al., 2003; Volpi et al., 2003). Auf den MPB scheint die Verfügbarkeit von AS hingegen nur dann einen inhibitorischen Einfluss auszuüben, wenn während und nach intensiver körperlicher Aktivität ein vermehrter Proteinabbau stattfindet (Biolo et al., 1997). Befindet sich der MPB hingegen auf einem basalen Level (siehe 1.1), bspw. im Zustand körperlicher Inaktivität oder moderater Aktivität, hat die Zufuhr von AS keine Inhibition des Abbaus zur Folge (Volpi et al., 2003). Lange Zeit wurde angenommen, dass die forcierte Proteinsynthese in der Skelettmuskulatur nach Proteinaufnahme vor allem durch die intrazelluläre (sarkoplasmatische) Konzentration von AS stimuliert wird. Durch die Arbeitsgruppe um Bohé et al. (2003) konnte hingegen nachgewiesen werden, dass der extrazelluläre AS-Spiegel der entscheidende Faktor ist. Insbesondere zu Beginn der MPS lässt sich eine Reduktion der sarkoplasmatischen Konzentration an AS nachweisen, was vermutlich durch den ansteigenden Verbrauch in der Proteinsynthese bei zeitgleich niedrigem in die Zelle gerichteten AS-Transport bedingt ist (Bohé et al., 2003).

Die Aufnahme von nicht essenziellen AS (NEAA = non-essential amino-acids) ist zur Stimulation der MPS nicht notwendig; EAA initiieren ohne die externe Zufuhr von NEAA effektiv eine anabole Stoffwechsellage in der Skelettmuskulatur (Tipton et al., 1999). In einer Untersuchung konnten Børsheim et al. (2002) nachweisen, dass die Zufuhr von 6 g einer Lösung EAA eine in etwa doppelt so große Stimulation der MPS auslöst wie die Zufuhr von 6 g einer gemischten Lösung AS mit jeweils 3 g NEAA und 3 g EAA. Obwohl während der Applizierung der EAA-Lösung ein Abfall der Konzentrationen einiger NEAA im Blutplasma registriert wurde, blieben die intrazellulären Konzentrationen auch der nicht verabreichten AS stabil. Der humane Organismus ist also in der Lage, für die Proteinsynthese benötigte NEAA aus extern aufgenommenen oder endogen verfügbaren EAA schnell bedarfsgerecht zu synthetisieren (Tipton et al., 1999). Zusammengefasst zeigt dies auf, dass die Aufnahme von NEAA für eine stimulierte Muskelproteinsynthese nicht notwendig ist. Weiterhin zeigt sich eine fehlende externe Zufuhr nicht geschwindigkeitsbegrenzend für den durch EAA initiierten Prozess der MPS.

Die MPS steht in einem dosisabhängigen linearen Verhältnis zur AS-Konzentration im Blutplasma (Giordano et al., 1996; Bohé et al., 2003). Es lässt sich jedoch beobachten, dass nicht die absoluten Konzentrationen der AS im Plasma für die Stimulation der MPS entscheidend sind, sondern kurzfristig auftretende Konzentrationsänderungen im Blutplasma. Während einer experimentellen Dauerinfusion von AS über einen Zeitraum von 6 h mit Einstellung eines Gleichgewichtes bei der 1,7-fachen AS-Konzentration gegenüber der basalen Plasmakonzentration konnte eine signifikant gesteigerte Proteinsynthese lediglich innerhalb der ersten 2 h nachgewiesen werden. Danach kehrte die Syntheserate trotz persistierender absoluter Plasmakonzentrationserhöhung auf ihr primäres basales Niveau für die verbleibenden 4 h zurück. Auffallend ist auch, dass die Synthesesteigerung nicht ausschließlich die myofibrilläre Proteinfraction, sondern alle drei Proteinfractionen der Skelettmuskulatur betraf (mitochondrial, sarkoplasmatisch und myofibrillär) (Bohé et al., 2001). Unterstützend für die Erkenntnis, dass Plasmakonzentrationsänderungen und nicht absolute Konzentrationen die MPS stimulieren, ist die Beobachtung, dass insbesondere schnell enteral resorbierbare Proteinvarianten mit dementsprechend schnelleren Konzentrationsänderungen im Plasma, wie Molken- und Sojaprotein, die MPS effektiver steigern als langsam resorbierbare Varianten (Tang et al., 2009). Eine unendliche Stimulation der Synthese ist nicht möglich. Ab der Aufnahme von mehr als 20 g eines hochwertigen (reich an EAA) Proteins geht die MPS in einen gesättigten Zustand über und erreicht einen Grenzwert. Jede weitere Proteinaufnahme führt lediglich zu einem Anstieg der Oxidation überschüssiger AS mit nachweisbarem Anstieg der Aktivität des Harnstoffzyklus (Bohé et al., 2003; Moore et al., 2009).

Zur Initiierung der MPS ist die Verfügbarkeit aller EAA obligat. Die Notwendigkeit der Zufuhr aller, und nicht nur isolierter EAA, zur effektiven Aktivierung der MPS zeigt das Beispiel der verzweigtkettigen EAA Valin, Leucin und Isoleucin, die neben Proteinpulver- und EAA-Präparaten mittlerweile zum Warenangebot vieler Produzenten von Nahrungsergänzungsmitteln und Sporternährung gehören. Diese drei verzweigtkettigen AS werden meist unter der englischen Bezeichnung branched-chain amino acids (BCAA) im Produktangebot geführt. Insbesondere Leucin wird von der Industrie eine einzigartige Stellung unter den BCAA zugeschrieben, da es bspw. im Tiermodell bei Futtermittel entzogenen Ratten ohne Zusatz anderer AS in der Lage war, die MPS zu induzieren und potent Translationsfaktoren des muskulären Stoffwechsels zu aktivieren (Anthony et al., 2000). In humanen Studien konnte die Applikation von BCAA eine Inhibition des Proteinabbaus induzieren, ein stimulierender Effekt auf die Proteinsynthese ließ sich jedoch nicht nachweisen. Insgesamt ergibt sich demnach ein reduzierter Gesamtproteinumsatz (Louard et al., 1990; Nair et al., 1992). Wolfe (2017) geht davon aus, dass dieser verringerte Umsatz mit negativen Effekten auf Muskelkraft und -leistung einhergeht, da der muskuläre Proteinumsatz einen grundlegenden Bestandteil der Regeneration muskulärer Leistungsfähigkeit umfasst. Ohne die Aufnahme aller EAA wird die verbleibende Quelle für AS,

der endogene Proteinabbau, für die Bereitstellung der fehlenden EAA zur MPS genutzt (Abb. 2). Demzufolge werden die EAA aus denselben muskulären Proteinen zur Verfügung gestellt, die während der MPS synthetisiert werden. So ist es biologisch gesehen nicht plausibel, dass bei alleiniger Supplementierung mit BCAA oder anderen isolierten EAA eine anabole Stoffwechsellage induziert wird. Um eine adäquate und anhaltende Stimulation der MPS zu erzeugen, ist daher das ausreichende Vorhandensein aller acht EAA im Plasma notwendig.

Einfluss von Kraft- und Ausdauersport

In der Phase nach erhöhter körperlicher Belastung, wie einem Kraft- oder Ausdauertraining, kommt es in der Skelettmuskulatur zu einem signifikanten Anstieg der MPS und MPB (Phillips et al., 1997; Biolo et al., 1999; Børsheim et al., 2002). Die Ergebnisse der Arbeit von Biolo et al. (1995) zeigen einen Anstieg der MPS von ca. 100 % gegenüber der basalen Syntheserate, wohingegen der MPB lediglich eine Zunahme um ca. 50 % bezogen auf die basale Abbaurate aufweist. Obwohl die Synthese gegenüber dem Abbau relativ verstärkt abläuft, ist die entscheidende Beobachtung, dass die Netto-MPS in derartigen Situationen insgesamt ohne die Zufuhr von Substraten für die MPS im katabolen Zustand verbleibt (Abb. 3) (Phillips et al., 1997; Børsheim et al., 2002).

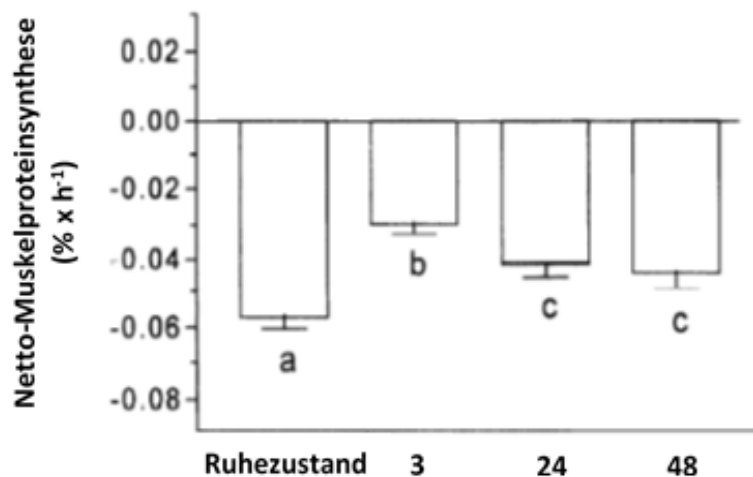


Abb. 3 – Netto-Muskelproteinsynthese im Ruhezustand und 3h, 24 h sowie 48 h nach einer isolierten Krafttrainingseinheit ohne Zufuhr essenzieller Aminosäuren (modifiziert und übersetzt nach Phillips et al., 1997)

Während bei der Aufnahme von EAA wahrscheinlich das erhöhte extrazelluläre Angebot und daraus folgend der vermehrte in die Zelle gerichtete Transport von AS für die Induktion des Muskelproteinanabolismus verantwortlich ist (Bohé et al., 2003), konnte die Ursache für die gesteigerte Proteinsynthese nach körperlicher Belastung bisher nicht eindeutig belegt werden. Eine Vermutung ist die durch Belastung der Muskulatur erhöhte Perfusion von Kapillaren (Abb. 4) und demzufolge die verringerte Diffusionsdistanz zwischen Muskelzelle und den im Blutplasma zirkulierenden AS (Biolo et al., 1997). Auffallend ist diesbezüglich die von Burd et al. (2011) festgestellte exklusive Sensibilisierung der myofibrillären Proteinfraction der Skelettmuskulatur nach einem Krafttrainingsreiz, anders als bei den oben dargestellten alle Fraktionen betreffenden Proteinumsatzraten nach Verabreichung von AS. Die trainingsinduzierte Schädigung der Myofibrillen führt zu einem vermehrten MPB mit zunehmendem Vorhandensein intra- und extrazellulärer AS. Dieses erhöhte Substratangebot könnte zumindest teilweise die vermehrte MPS nach Trainingsreizen erklären (Phillips et al., 1997).

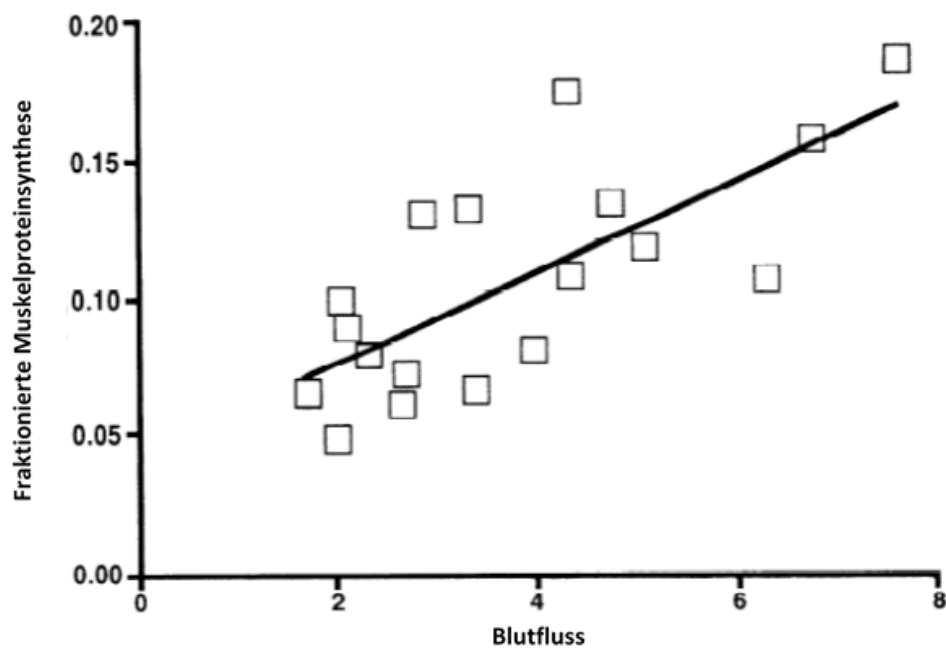


Abb. 4 – Verhältnis zwischen arteriellem Blutfluss als Vielfaches der basalen Durchblutungsrate und der fraktionierten Muskelproteinsynthese (modifiziert und übersetzt nach Biolo et al., 1997)

Zwischen den drei bedeutendsten Protagonisten des Muskelproteinmetabolismus, den essenziellen AS, dem Insulin und intensiver körperlicher Aktivität, scheint es einen synergistischen Effekt zu geben, der die Summe der Einzelwirkungen auf die MPS übersteigt (Abb. 5) (Rasmussen et al., 2000).

Nach alleiniger ausgiebiger körperlicher Anstrengung wird die MPS-Rate um ca. 100 % erhöht, bei Kombination mit einer Hyperinsulinämie und Zufuhr von AS kommt es zu einer um ca. 400 % erhöhten Syntheseaktivität in der Skelettmuskulatur (Rasmussen et al., 2000). Dieser synergistische Effekt von körperlicher Belastung auf die MPS fördernde Fähigkeit von AS scheint mindestens für 24 h (Burd et al., 2011), möglicherweise bis zu 48 h nach der akuten Belastung anzuhalten (Phillips et al., 1997). Dabei ist eine ausreichend hohe Intensität der Belastung notwendig, um diesen Synergismus zu induzieren. Belastungsprotokolle, bei denen die Muskulatur nicht bis zur Ermüdung gereizt und keine myofibrilläre Schädigung hervorgerufen wird, ermöglichen nach Burd et al. (2011) keine anhaltende Potenzierung des stimulierenden Effektes von EAA auf die MPS.

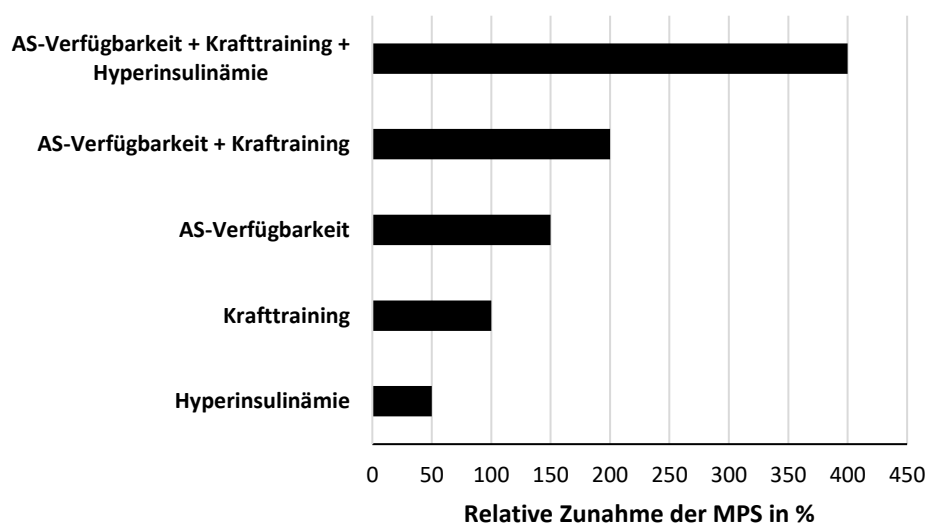


Abb.-5 – Maximale relative Zunahme der Muskelproteinsynthese und synergistischer Effekt in Abhängigkeit von Einflussfaktoren der MPS (nach Daten von Rasmussen et al., 2000) Anmerkung: Zahlenwerte durch Rasmussen et al. gerundet

1.4 Optimaler Zeitpunkt einer Protein- und Aminosäureaufnahme zur Stimulation der Muskelproteinsynthese

Sowohl die in Kapitel 1.3 erwähnte Sättigungsdosis der MPS bei einmaliger Aufnahme einer Proteinportion, als auch die Ergebnisse der Arbeit von Mamerow et al. (2014), die eine 25 % höhere kumulative MPS bei einer über den Tag gleichmäßig verteilten Proteinaufnahme in kleinen Einzeldosen im Vergleich zu einer unausgeglichenen täglichen Aufnahme in wenigen Bolusgaben zeigen, lassen den Schluss zu, dass die absolute tägliche Aufnahme von AS und Proteinen nicht die einzige diätetische Determinante des Muskelproteinmetabolismus darstellt. Das Zusammenspiel zwischen Timing und Quantität der Aminosäurenverfügbarkeit sowie ausreichend intensiven Belastungen der Muskulatur ist vermutlich entscheidend für eine optimale Ausnutzung der Synthesekapazität der Skelettmuskulatur. So zeigt sich eine intermittierende Verabreichung (alle 4 h 20 g Protein) einer 80 g Gesamtproteindosis direkt nach einer Krafttrainingseinheit einer Bolusgabe (2x 40 g Protein) hinsichtlich der gemessenen kumulativen MPS überlegen (Areta et al., 2013).

Eine Arbeit von Tipton et al. (2001) verdeutlicht, dass nicht nur das Verteilungsmuster, sondern auch der Zeitpunkt einer Protein- oder AS-Aufnahme Einfluss auf die Höhe des stimulierenden Effektes der MPS ausübt. So konnte die Applikation eines AS-Kohlenhydrate-Supplements vor einem Krafttraining die Netto-Synthese von Muskelproteinen stärker aktivieren als die Applikation direkt im Anschluss an das Training. Diesem Effekt liegt nach Tipton et al. (2001) vermutlich die Maximierung des einwärtsgerichteten AS-Transportes der verfügbaren AS durch die zunehmende Perfusion der Muskulatur während des Trainings zugrunde. Auch fällt bei sofortiger Nahrungsaufnahme nach einer intensiven Trainingseinheit die Stimulation der Netto-MPS größer aus als bei einer um 3 h verzögerten Aufnahme. Erfolgt hingegen die Zufuhr erst 1 h nach einem vorhergehenden Training, lässt sich kein signifikanter Unterschied gegenüber der Netto-Synthese bei Gabe nach 3 h feststellen (Levenhagen et al., 2001).

Wie sich diese molekularen Erkenntnisse in der Praxis auf makroskopisch-funktionelle Parameter wie Muskelhypertrophie und muskuläres Kraftpotenzial auswirken, wurde in einer Metaanalyse von Schoenfeld et al. (2013) untersucht. Eine einfache gepoolte Datenerhebung von Arbeiten mit minimaler Gabe von 6 g EAA oder entsprechendem Proteinäquivalent innerhalb 1 h nach Trainingsstimulus zeigte einen leichten Effekt auf die Hypertrophie ohne signifikante Auswirkungen auf die Maximalkraft. Nach Einberechnung von Kovariablen hingegen konnte dieser Effekt auf eine erhöhte Gesamtproteinmenge zurückgeführt werden anstatt auf gezieltes Timing. Es verbleibt aktuell hinsichtlich der Fragestellung, ob bei funktionellen Parametern wie Hypertrophie und Maximalkraft der Skelettmuskulatur größere Zunahmen beobachtet werden können, wenn AS oder entsprechende Proteinäquivalente direkt vor oder nach einem

Trainingsstimulus aufgenommen werden, weiterhin eine Diskrepanz zwischen den eindeutigen Ergebnissen auf molekularer und den ambivalenten Resultaten auf makroskopisch-funktioneller Ebene. Im Zweifel sollte beim Versuch, die muskuläre Proteinsynthese maximal zu stimulieren und Anpassungsreaktionen an Trainingsstimuli zu optimieren, eine Aufnahme von Proteinen oder AS direkt vor oder nach einem Kraft- oder Ausdauertraining erfolgen, da eine zeitversetzte Zufuhr von AS oder Proteinäquivalenten vermutlich keinen Mehrwert besitzt.

1.5 Gesundheitliche Auswirkungen einer erhöhten Proteinaufnahme

Wenn Probanden oder Athleten über einen Zeitraum von mehreren Wochen oder länger die Aufnahme von AS durch Proteinpräparate oder freie AS steigern, stellt sich auch die Frage von negativen gesundheitlichen Auswirkungen einer solchen diätetischen Intervention. Die Abnahme der filtrierenden Nierenfunktion ist eine häufig geäußerte Befürchtung hinsichtlich negativer gesundheitlicher Auswirkungen einer erhöhten Proteinaufnahme. Von Addis (1948) wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine Restriktion der Proteinaufnahme der Abnahme der Nierenfunktion entgegenwirken kann. Diese wurde ca. 30 Jahre später von Brenner et al. (1982) wieder aufgegriffen und dahingehend weiterentwickelt, dass die für die westliche Welt typische erhöhte Proteinzufuhr durch den damit einhergehenden vermehrten renalen Blutfluss und die gesteigerte glomeruläre Filtrationsrate (GFR) eine progrediente glomeruläre Sklerose fördere. Brenner et al. vermuteten, dass dieser Pathomechanismus sowohl bei Personen mit bestehender Nierenfunktionseinschränkung als auch bei gesunden eine Abnahme der filtrierenden Nierenfunktion induziere. Diese Hypothese konnte in der Folge bei bereits niereninsuffizienten Patienten mehrfach bestätigt werden. So führte die Restriktion der täglichen Aufnahme auf 0,4 g/kg KG Protein bei Personen mit vorbestehender chronischer Niereninsuffizienz zu einer signifikanten Verminderung des Progresses der Erkrankung (Ihle et al., 1989). Die Gültigkeit der Brenner-Hypothese wird bei niereninsuffizienten Menschen allgemein akzeptiert, eine protektive Wirkung der Aufnahmebeschränkung bei Personen ohne vorbestehende Nierenfunktionseinschränkung konnte bisher nicht nachgewiesen werden (Martin et al., 2005). Eine mit 3,4 g/kg KG/d proteinreiche Diät zeigte über einen Zeitraum von 8 Wochen keine Abnahme der Nierenfunktion hinsichtlich der GFR bei nierengesunden Probanden (Antonio et al., 2015). Selbst die Aufnahme von 2,5 bis 3,3 g/kg KG/d über einen Untersuchungszeitraum von einem Jahr korrelierte nicht mit einer nachweisbaren Verringerung der Nierenfunktion. Ebenso konnte laborchemisch keine Abnahme der Leberfunktion nachgewiesen werden (Antonio et al., 2016). Die Internationale Gesellschaft für Sporternährung (ISSN = International Society of Sports Nutrition) konstatiert diesbezüglich in einer Stellungnahme, dass die Aufnahme von 1,4 bis

2 g/kg KG/d Protein bei gesunden und sportlich aktiven Personen als unbedenklich eingestuft werden kann (Jäger et al., 2017).

Die aktuelle Datenlage lässt den Schluss zu, dass eine vermehrte Protein- und AS-Zufuhr bei gesunden Individuen hinsichtlich Leber- und Nierenfunktion über einen kurzen Zeitraum bis zu einem Jahr als unschädlich einzuschätzen ist. Ungeachtet dessen kann die exzessive Aufnahme von Proteinen und AS zu gastrointestinalen Nebenwirkungen wie Diarrhö und Meteorismus führen (Lawrence und Kirby, 2002). Personen mit eingeschränkter Nierenfunktion sollte eine Erhöhung der täglichen Proteinaufnahme über Diät oder Supplementierung hingegen abgeraten werden. Bei Untersuchungen mit Steigerungen der täglichen Protein- und AS-Aufnahme ist dementsprechend darauf zu achten, solche prädisponierten Individuen bei der Planung auszuschließen.

1.6 Wirksamkeit von Aminosäuren- und Proteinsupplementierung auf funktionelle Parameter

Auswirkungen einer erhöhten Protein- oder AS-Verfügbarkeit auf Parameter der Maximalkraft

Im Hinblick auf die Fragestellung, ob eine erhöhte Aufnahme von AS oder vollständigen Proteinen in Kombination mit einem Krafttraining die maximale Kraftentwicklung positiv beeinflussen kann, existieren bereits eine Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten. Die Ergebnisse dieser Studien sind ambivalent, wobei in einer wesentlichen Anzahl keinen positiven Effekte nachgewiesen werden (u. a. Weisgarber et al., 2012; Herda et al., 2013; Mobley et al., 2017). Erskine et al. (2012) untersuchten den Einfluss einer zusätzlichen Aufnahme von 40 g Molkenprotein täglich während eines zwölfwöchigen Trainings des Musculus biceps brachii gegenüber einer Verabreichung von Placebo auf die maximal mögliche Kraftentfaltung des Muskels. Obwohl das Trainingsprogramm aufgrund der Zunahme der Maximalkraft in beiden Gruppen per se effektiv gestaltet war, konnte kein signifikanter zusätzlicher Kraftzuwachs in der Interventionsgruppe durch die additional Proteingabe erreicht werden.

Es existieren hingegen auch umfangreiche Belege für die Wirksamkeit einer zusätzlichen Protein- oder AS-Aufnahme. So hatte die Erhöhung der täglichen Proteinaufnahme mittels Supplementierung von 1,2 g/kg KG auf 2,0 g/kg KG während eines zwölfwöchigen Trainingszyklus einen nachweisbaren Interventionseffekt bei der Maximalkraft in der Übung Kniebeuge ($p < 0,05$). Einschränkung resultierte aus dieser Proteinsupplementierung keine signifikante Steigerung bei der anderen im Untersuchungsprotokoll getesteten Übung Bankdrücken in der Interventionsgruppe (Hoffman et al., 2007). Auch die zusätzliche Aufnahme eines Präparates mit den acht essenziellen AS zur gewohnten Mischkost konnte während eines sechswöchigen Trainingsprotokolls die Maximalkraft in zehn von zwölf getesteten Übungen gegenüber einer Kontrollgruppe signifikant steigern (Hottenrott und Neumann, 2006). In einer umfangreichen Metaanalyse von Cermak et al. (2012) wurden die Ergebnisse von 22 randomisierten und kontrollierten Studien mit insgesamt 680 eingeschlossenen Probanden zusammengefasst, wonach sich durch Proteinsupplementierung im Vergleich zur Gabe eines Placebos ein durchschnittlicher Kraftzuwachs von 13,5 kg (95 %-KI: 6,4–20,7 kg; $p < 0,005$) bei der Übung Beinpresse nach mindestens 12 Wochen Krafttraining ergab.

Eine mögliche Erklärung für die Diskrepanz der Ergebnisse verschiedener Studien liefert die Übersichtsarbeit von Pasiakos et al. (2015). Die Autoren konnten aufzeigen, dass besonders zu Beginn einer Supplementierung (Zeitdauer < 8 Wochen) bei vorher untrainierten Probanden die Leistungssteigerungen in Kraftparametern nicht positiv beeinflusst werden konnten. Erst mit zunehmender Trainingsdauer oder Intensivierung des Trainingsprotokolls ließ sich der positive

Effekt auf das muskuläre Kraftpotenzial nachweisen. Eine mutmaßliche Begründung sehen Pasiakos et al. (2015) darin, dass bei Neubeginn eines Krafttrainings bei den Probanden neuronale Anpassungen gegenüber strukturellen und metabolischen Adaptionsprozessen überwiegen. So ist es möglich, dass der Untersuchungszeitraum in Studien ohne Nachweis eines positiven Effektes einer zusätzlichen Protein- und Aminosäureaufnahme, insbesondere bei unerfahrenen Probanden, zu begrenzt gewählt und demnach der Nachweis signifikanter Effekte limitiert wurde. Weiterhin ist die Supplementierung mit Proteinen oder AS nicht die einzige Variable für erfolgreiche Optimierung trainingsbedingter Anpassungen. Cintineo et al. (2018) sehen neben der täglichen Proteinaufnahme die tägliche Energieverfügbarkeit als eine entscheidende Komponente für langfristige Anpassungen im Sinne einer vermehrten muskulären Hypertrophie und Kraftentwicklung. Es ist denkbar, dass sich Probanden in Studien, in denen keine signifikanten Effekte nachgewiesen werden konnten, in einem kalorischen Defizit befanden. Grundsätzlich scheinen jedoch die Daten darauf hinzuweisen, dass bei Optimierung der Kovariablen ‚Trainingsdauer‘, ‚Trainingsintensität‘ und ‚Energieaufnahme‘ die zusätzliche Verfügbarkeit von AS bzw. Proteinen die Maximalkraftentwicklung in geringem bis moderatem Ausmaß positiv beeinflussen kann (Jäger et al., 2017).

Auswirkungen einer erhöhten Protein- oder AS-Verfügbarkeit auf Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit

Es ist eine verbreitete Überzeugung unter Sportlern, dass die tägliche Proteinzufuhr vor allem für die Hypertrophie der quergestreiften Skelettmuskulatur und deren maximales Kraftpotenzial eine Rolle spielt (Moore et al., 2014). In den vergangenen Jahren wurde der Fokus der Forschung zunehmend auch auf die Wirkung von Protein- bzw. AS-Zufuhr als möglicherweise bedeutende Variable für die Leistungsentwicklung bei ausdauerorientierten Belastungen gelegt. Erwiesen ist, dass die Verfügbarkeit von AS nach ausdauerotypischen Belastungen eine wesentliche Rolle bei der Re- und Neusynthese myofibrillärer und mitochondrialer Proteinfraktionen spielt, wodurch die Basis langfristiger trainingsinduzierter Adaptionen an Ausdauerleistungen (Zunahme der Mitochondriendichte und der aeroben Kapazität) gelegt wird (Moore et al., 2014).

Der aktuelle Forschungsstand zu diesem Fragenkomplex ist begrenzt. Die derzeitigen Erkenntnisse beziehen sich eher auf kurzfristige Effekte als auf langfristige Anpassungsmechanismen einer Steigerung der täglichen AS-Verfügbarkeit.

Breen et al. (2010) untersuchten die Fragestellung, ob die Zugabe von Proteinpulver zu einem Kohlenhydrate-Getränk während eines Zeitfahrens auf dem Ergometer einen Vorteil gegenüber der alleinigen Aufnahme von Kohlenhydraten erbringen könne. Ein positiver Effekt konnte nicht nachgewiesen werden, die Probanden benötigten keine signifikant unterschiedliche Zeitdauer zur Absolvierung des Zeitfahrens. Ähnliche Ergebnisse wurden durch eine Studie von van Essen und Gibala (2006) erbracht, in der bei einem 80-km-Zeitfahren auf dem Ergometer keine Leistungssteigerung durch Zusatz von Protein im Vergleich mit der reinen Supplementierung mit einem auf Kohlenhydraten basierenden Getränk nachgewiesen werden konnte. Wurde dahingegen die Zeit bis zum Eintritt von Erschöpfung bei vorgegebener Belastungsintensität auf dem Ergometer (bei 75 % und 85 % der maximalen Sauerstoffkapazität ($\dot{V}O_{2max}$)) als Untersuchungsvariable gewählt, waren Probanden bei Verabreichung eines Protein-Kohlenhydrate-Mischgetränkes in der Lage, die Leistung signifikant länger aufrechtzuerhalten als solche, die während der Belastung ausschließlich Kohlenhydrate in Getränkeform zu sich nahmen ($p < 0,05$) (Saunders et al., 2004). Limitierend ist aber in dieser Untersuchung das kalorische Ungleichgewicht der beiden Gruppen zu werten, da durch den Zusatz von Protein eine zusätzliche Aufnahme von 139 kcal erfolgte und die frei werdenden AS nachweislich im Hinblick auf lange, erschöpfende Ausdauerleistungen zur Energiegewinnung genutzt werden können (Wagenmakers, 1998). Besonders in Zuständen von metabolischer Erschöpfung wie nachlassender Adenosintriphosphat(ATP)-Verfügbarkeit, zellulärer Azidose und leeren Glykogenspeichern nehmen AS vermehrt eine Rolle als Energiesubstrat ein (Tarnopolsky, 2004).

Wie sich eine mittel- bis langfristige Erhöhung der Verfügbarkeit von AS (durch Zufuhr intakter Proteine oder in Form freier AS) für den Metabolismus auf durch Ausdauertraining induzierte Leistungsveränderungen auswirkt, ist bisher wissenschaftlich unzureichend untersucht. Macdermid und Stannard (2006) verglichen die Auswirkungen einer für 7 d mittels Molkenprotein angereicherten Diät ($3,3 \pm 0,4$ g/kg KG/d Protein) mit einer für Ausdauerathleten empfohlenen kohlenhydratreichen isokalorischen Diät ($1,3 \pm 0,4$ g/kg KG/d Protein) auf die Leistung bei einem anschließenden Ergometer-Zeitfahren. Nach der Periode mit zusätzlicher Proteinaufnahme kam es zu einer signifikanten Einschränkung der Leistungsfähigkeit beim Belastungstest. Nach 7 d proteinreicher Kost benötigten die Probanden mehr Zeit zur Absolvierung des Zeitfahrens als nach der Kohlenhydrate-Diät-Periode (153 ± 36 min in der Proteingruppe vs. 127 ± 34 min in der Kontrollgruppe; $p = 0,010$). Auffällig war auch, dass die Leistungsfähigkeit der ausdauererfahrenen Sportler bei erhöhter Proteinaufnahme bereits zu Beginn des Zeitfahrens signifikant eingeschränkt war. Eine Arbeit, in der der Effekt einer zehnwöchigen erhöhten Proteinzufuhr und daraus resultierender Verfügbarkeit von AS-Substrat untersucht wurde, ist die Studie von Roberson et al. (2018), deren Ergebnisse erst nach Erhebung der Daten für die vorliegende Arbeit veröffentlicht wurden. Eine tägliche additional

Verabreichung von 50 g Proteinsupplement über 10 Wochen zur gewohnten Diät der Probanden

mit demnach im Schnitt entstehender Proteinaufnahme von 2,1 g/kg KG/d wurde hinsichtlich ihrer Wirkung auf einen abschließenden Zeitlauf untersucht. Die Teilnehmer absolvierten in diesem Zeitraum ein progressives Lauftraining. Sowohl die Gruppe mit Proteinsupplementierung als auch die Placebo-Kontrollgruppe konnten im Verlauf ihre Leistung beim Zeitlauf nachweisbar steigern, der Fortschritt in der Protein-Gruppe fiel mit lediglich im Mittel 40 s gegenüber 91 s in der Kontrollgruppe geringer aus ($p = 0,08$).

In Zusammenschau der wenigen bisherigen Forschungsergebnisse lässt sich die Vermutung äußern, dass eine zusätzliche Protein- bzw. AS-Aufnahme über die empfohlenen täglichen Bedarfsmengen hinaus keinen Vorteil bei kurz- wie auch langfristigen Adaptionsprozessen im Rahmen von Ausdauertraining bietet. Es erscheint aufgrund der bisherigen Erkenntnisse der Arbeiten auf diesem Gebiet möglich, dass sich eine erhöhte Zufuhr tendenziell negativ auf die langfristige Entwicklung der Ausdauerleistungsfähigkeit auswirkt. AS können kurzfristig bei Gabe im Rahmen erschöpfender Ausdauerleistungen als alternative Energiequelle bei sinkender Verfügbarkeit von Glucose und Fettsäuren fungieren. Im Zweifel sollte jedoch auf Kohlenhydrate als Energieträger zur kurzfristigen Energieaufnahme zurückgegriffen werden. Die Energiegewinnung aus AS ist grundsätzlich möglich, jedoch stellt die Metabolisierung von AS in der Skelettmuskulatur einen ineffektiveren Energie-Gewinnungsprozess als die Energiegewinnung aus Glucose dar. Dies hängt u. a. mit der Aktivierung des Enzyms Branched-chain alpha-keto acid dehydrogenase complex zusammen, das zu einem Nettoentzug von Metaboliten des Citratzyklus führt. Dieser Prozess beeinträchtigt die zelluläre ATP-Synthese und induziert eine progrediente muskuläre Erschöpfung (Wagenmakers, 1998).

Auswirkungen einer erhöhten Protein- oder AS-Verfügbarkeit auf die Körperzusammensetzung

Nach dem Kompartiment-Modell kann die gesamte Körpermasse vereinfachend in Fettmasse (FM) und fettfreie Masse (FFM), die jegliche Körperzellmasse außer der FM (Knochensubstanz, Gesamtkörperwasser, organische und muskuläre Zellmasse sowie diverse andere Zellmassen) enthält, unterteilt werden (Kyle et al., 2004a). Untersuchungen hinsichtlich der FFM sowie des Anteils der FM an der gesamten Körpermasse (Körperfettanteil) werden u. a. verwendet, um die Effektivität eines Trainingsprogramms einzuschätzen (Sergi et al., 2017). Eine ausführliche Erklärung des Kompartiment-Modells sowie der Analysemöglichkeiten ist in Kapitel 3.4 zu finden. In einer Vielzahl von Studien wurde bereits der Fragestellung nachgegangen, ob eine erhöhte Proteinaufnahme in Kombination mit repetitiven Trainingsstimuli positive Auswirkungen auf die Zusammensetzung des Körpers hat. Die Datenlage diesbezüglich zeigt sich uneinheitlich. In einem bedeutenden Anteil der Untersuchungen konnte kein signifikant positiver Effekt einer Proteinsupplementierung in Kombination mit körperlichem Training hinsichtlich

Parametern der Körper- respektive Muskel-Zusammensetzung festgestellt werden (u. a. Hoffman et al., 2007; Erskine et al., 2012). Herda et al. (2013) beispielsweise untersuchten, wie sich ein achtwöchiges Krafttraining in Kombination mit der Verabreichung von verschiedenen Proteinvarianten bei 106 männlichen Probanden mit keiner oder nur geringer Trainingserfahrung auf die Körperzusammensetzung und die Muskelquerschnittsfläche des Oberschenkels auswirkt. Ein signifikanter Unterschied konnte gegenüber der Placebogruppe oder den Teilnehmern mit Training ohne jegliche Supplementierung nicht nachgewiesen werden. Demgegenüber steht die von Cermak et al. (2012) veröffentlichte Metaanalyse mit Daten aus 22 randomisiert-kontrollierten Studien und einer Gesamtzahl von 680 eingeschlossenen Probanden. In dieser Arbeit konnte bei der Proteinsupplementierung eine vermehrte Zunahme der FFM von durchschnittlich 0,69 kg (95 %-KI: 0,47–0,91 kg; $p < 0,00001$) gegenüber Placebo-Präparaten bei mindestens sechswöchigem Krafttraining nachgewiesen werden. Auch eine umfassende Übersichtsarbeit von Pasiakos et al. (2015) zeigt diesbezüglich aufschlussreiche Ergebnisse. So erbrachte eine zusätzliche Verabreichung von Protein bei untrainierten Probanden wie bei den beschriebenen Auswirkungen auf die Maximalkraft keinen Vorteil in den initialen Wochen (< 8 Wochen) eines neu begonnenen Krafttrainings. Wird das Training hingegen länger als acht Wochen durchgeführt, so weisen Probanden mit erhöhter Proteinzufuhr signifikant mehr Zugewinne an FFM auf. In Bezug auf die Probanden mit vorheriger Trainingserfahrung kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Supplementierung von Protein erst dann einen nachweisbaren positiven Effekt auf die Körperzusammensetzung hat, wenn diese über einen Zeitraum von mehr als 4 Wochen erfolgt. Wird die tägliche Proteinaufnahme auf das Zwei- bis Dreifache der empfohlenen Mindestaufnahmemenge von 0,8 g/kg KG/d in Phasen kalorischer Restriktionen (z. B. Diäten) erhöht, so gibt es Belege, dass dies den Erhalt von FFM bei gleichzeitigem Verlust von FM fördert (Murphy et al., 2015). Die bisherige Forschung, beispielhaft durch die zitierten Arbeiten dargestellt, lässt den Schluss zu, dass insbesondere Einzelstudien mit geringer Probandenzahl oder kurz gewählten Interventionszeiträumen dabei versagen, einen positiven Effekt von Protein- und AS-Supplementen auf die Körperzusammensetzung nachzuweisen. Untersuchungen mit länger gewählten Interventionszeiträumen und Metaanalysen mit großen Probandenzahlen deuten hingegen darauf hin, dass die Anpassung der Körperzusammensetzung bei langfristigen, repetitiven Trainingsreizen durch vermehrte Aufnahme von Proteinen oder AS positiv beeinflusst werden kann.

2 Zielstellung

Nahrungsergänzungsmittel wie AS-Präparate und Proteinhydrolysate gewinnen bei Freizeitsportlern zunehmend an Beliebtheit (Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft, 2018; Kreutz, 2018). Diese werden häufig mit dem Ziel eingenommen, die körperlichen Anpassungsreaktionen an Kraft- aber auch Ausdauertrainingsprozesse diätetisch zu unterstützen. Wie die Ausführungen der Einleitung aufzeigen, gilt es als gesichert, dass die extrazelluläre Verfügbarkeit von EAA den potentesten Einflussfaktor auf die Proteinsynthese der quergestreiften Skelettmuskulatur bildet. Die Stimulation der MPS durch AS betrifft nicht nur die für Maximalkraft bedeutende myofibrilläre Proteinfraction, sondern auch die mitochondriale Proteinfraction, die insbesondere bei für Ausdauerleistungen typischen Belastungen von hoher Bedeutung ist. Im Zusammenspiel mit physischen Trainingsreizen entfaltet die Verfügbarkeit von AS im Plasma darüber hinaus einen synergistischen Effekt auf die Synthese von Proteinen der Muskulatur. Dennoch besteht beim aktuellen Forschungsstand eine Diskrepanz zwischen den eindeutigen Erkenntnissen auf molekularer und den häufig ambivalenten Resultaten auf makroskopisch-funktioneller Ebene. Während umfangreiche Untersuchungen darauf hinweisen, dass AS- und Proteinpräparate die Hypertrophiereaktion und die Maximalkraftentwicklung der Muskulatur durch repetitive Trainingsreize im geringen bis moderaten Umfang steigern können, verbleibt speziell im Bereich des Einflusses von AS respektive Proteinen auf die Leistungsfähigkeit und auf Adaptionprozesse bei Ausdauerbelastungen ein Forschungsdefizit.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, zu untersuchen, ob die Supplementierung von EAA die Anpassungsprozesse und Leistungsentwicklung bei Kraftausdauer- und Ausdauertraining positiv beeinflussen kann. Hierzu soll mittels einer randomisierten und kontrollierten sowie doppelt verblindeten Studie die Fragestellung beantwortet werden, ob die additional Aufnahme von EAA mittels des Präparates „Amino4U®“ in Kombination mit einem kraftausdauer- und ausdauerorientierten sechswöchigen Trainingszyklus einen Vorteil bei der Entwicklung von Parametern der Maximalkraft (nachzuweisen anhand der one-repetition maximum (1-RM = 1-Wiederholung Maximalkraft)) und insbesondere der Kraftausdauer- (gemessen als maximale Anzahl an Wiederholungen bei 60 % der 1-RM) sowie Ausdauerleistungsfähigkeit (mittels Physical Working Capacity(PWC)₁₇₀-Test, Erholungs- und Ruheherzfrequenz) bei männlichen Freizeitsportlern bietet. Weiterhin soll mit dieser Arbeit die Fragestellung evaluiert werden, ob die durch die Aufnahme des Präparates erhöhte Zufuhr von EAA bei einer Kombination mit einem sechswöchigen Kraftausdauer- und Ausdauertrainingsprogramm die Körperzusammensetzung im Sinne einer Anreicherung von FFM und einer Verringerung des Körperfettanteils (nachzuweisen durch bioelektrische Impedanzanalyse (BIA)) bei einem männlichen Probandenkollektiv positiv beeinflussen kann.

Zum Zeitpunkt der Datenerhebung konnte in der Literatur keine Untersuchung gefunden werden, in deren Rahmen die Effekte einer Verabreichung von EAA auf die genannten Parameter über einen mehrwöchigen Zeitraum untersucht wurden, wie dies in der vorliegenden Arbeit der Fall ist. Es wurde die biomedizinische Meta-Datenbank ‚PubMed‘ zum Zeitpunkt 03/2017 unter folgenden Stichwörtern ohne Einschränkung des Zeitraumes der Publikation durchsucht: ‚essential amino acids‘ AND ‚endurance‘, ‚essential amino acids‘ AND ‚endurance performance‘, ‚essential amino acids‘ AND ‚endurance capacity‘.

Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wurden folgende Hypothesen gebildet:

H1: Die Verabreichung von essenziellen AS in Kombination mit einem sechswöchigen Trainingszyklus verändert signifikant die Ausdauerleistungsfähigkeit, überprüft durch die Wattleistung/kg KG bei einer Herzfrequenz von 170 beats per minute (bpm = (Herz-)schläge je Minute), die Ruheherzfrequenz sowie die Erholungsherzfrequenz gegenüber einer Kontrollgruppe.

H2: Die Verabreichung von essenziellen AS in Kombination mit einem sechswöchigen Trainingszyklus verändert signifikant die Maximalkraft und Kraftausdauerleistung, überprüft durch die 1-RM und die Wiederholungszahl bei 60 %/1-RM gegenüber einer Kontrollgruppe.

H3: Die Verabreichung von essenziellen AS in Kombination mit einem sechswöchigen Trainingszyklus verändert signifikant die Körperzusammensetzung, überprüft durch die Parameter fettfreie Masse (in kg), Körperwasseranteil (in %) und Körperfettanteil (in %), gegenüber einer Kontrollgruppe.

3 Material und Methodik

3.1 Probandenkollektiv und anthropometrische Daten

Die Gesamtstichprobe umfasste insgesamt 44 männliche Probanden in einem Alter von min. 18 Jahren und max. 35 Jahren. Im Mittel waren die Probanden 26,1 Jahre alt, mit einer Standardabweichung (SD) von $\pm 3,8$ Jahren. Die Rekrutierung der Studienteilnehmer erfolgte hauptsächlich über Aushänge in den Räumlichkeiten des Universitätsklinikums Halle (Saale) und der Clever Fit GmbH (Burgstr. 33, 06114 Halle) sowie über Aufrufe in den sozialen Medien mit Angabe des durchführenden Instituts, der Trainingsstätte, der Einschlusskriterien, des Studiendesigns und der Kontaktdaten des Studienpersonals. Interessierten wurden die Details des Studienablaufs und der Ein- und Ausschlusskriterien in persönlichen oder telefonischen Gesprächen vorher umfassend erläutert. Personen, die in einem Abhängigkeitsverhältnis (z. B. Doktoranden des Instituts, Mitarbeiter) zu den Studienverantwortlichen standen, wie auch solche, die ein oder mehrere Ausschlusskriterien erfüllten, wurden von der Teilnahme an der Studie ausgeschlossen.

Eine Aufklärung über durchzuführende Untersuchungen, eventuelle Belastungen und Risiken wie auch Verhaltensweisen in den Räumlichkeiten der Clever Fit GmbH wurde im Vorfeld vorgenommen und schriftlich fixiert. Ebenfalls wurde im Rahmen dieser Aufklärungsgespräche die Zustimmung der Studienteilnehmer zur Studie sowie zur Verwendung der Daten unter Beachtung geltender Datenschutzgesetze schriftlich dokumentiert (siehe Anhang). Zur Evaluierung von für die körperliche Leistungsfähigkeit relevanten Erkrankungen wurden Einzelgespräche durch das Studienpersonal mit den Probanden geführt, in denen anamnestische Hinweise für kardiovaskuläre und orthopädische oder bereits bekannte Erkrankungen erfragt wurden (siehe Einschluss- und Ausschlusskriterien am Ende von Kapitel 3.1.). Die Teilnahme an der Studie erfolgte unentgeltlich.

Im Rahmen einer Eingangsdagnostik vor Beginn der Intervention wurden die in den Tabellen dargestellten anthropometrischen Werte der Probanden ermittelt (Tab. 2 und Tab. 3). Eine genaue Beschreibung der verwendeten Untersuchungsmethoden erfolgt in Kapitel 3.4. Von den insgesamt 44 Probanden beendeten 38 die Studie erfolgreich und erfüllten die gesetzte Mindestanzahl von 17 Trainingseinheiten bei insgesamt max. 18 Trainingseinheiten (Dropout $n = 6$ (14 %), davon $n = 1$ unfallbedingt, $n = 2$ persönliche Gründe, $n = 1$ krankheitsbedingt, $n = 2$ ohne Angabe von Gründen).

Tab. 2 – Anthropometrische Daten des Probandenkollektivs bei Studienbeginn I (n=38)

	Alter [Jahre]			Größe [cm]			Gewicht [kg]		
	Amino (n=18)	Placebo (n=20)	Gesamt (n=38)	Amino (n=18)	Placebo (n=20)	Gesamt (n=38)	Amino (n=18)	Placebo (n=20)	Gesamt (n=38)
MW	25,4	26,6	26,1	185,0	186,0	186,0	80,8	87,7	84,4
SD	3,8	3,8	3,8	8,4	8,2	8,2	10,6	17,0	14,5
Min	18,0	21,8	18,0	172,0	174,0	172,0	61,9	63,5	61,9
Max	34,1	35,6	35,6	200,0	204,0	204,0	105,0	129,0	129,0

Abkürzungen: Mittelwerte (MW), Standardabweichung (SD), Minima (Min) und Maxima (Max)

Tab. 3 – Anthropometrische Daten des Probandenkollektivs bei Studienbeginn II (n=38)

	Fettanteil [%]			Fettfreie Masse [kg]			Wasseranteil [%]		
	Amino (n=18)	Placebo (n=20)	Gesamt (n=38)	Amino (n=18)	Placebo (n=20)	Gesamt (n=38)	Amino (n=18)	Placebo (n=20)	Gesamt (n=38)
MW	14,8	17,8	16,4	65,3	66,2	65,8	60,4	57,6	58,9
SD	3,1	6,6	5,4	8,4	12,7	10,7	2,6	5,4	4,5
Min	9,5	6,8	6,8	51,0	32,7	32,7	54,0	46,9	46,9
Max	23,2	32,1	32,1	80,8	85,0	85,0	65,1	66,9	66,9

Abkürzungen: Mittelwerte (MW), Standardabweichung (SD), Minima (Min) und Maxima (Max)

Bei den Ausschlusskriterien wurde insbesondere die Einnahme von Nahrungsergänzungsmitteln einbezogen, die einen Störeinfluss auf den Effekt des Aminosäurepräparates „Amino4U®“ hätten haben können (siehe Ausschlusskriterien). Zur Festlegung der kardiologischen Ausschlusskriterien wurde die Leitlinie zur Ergometrie der Deutschen Gesellschaft für Kardiologie als Orientierung herangezogen (Trappe und Löllgen, 2000).

Für die Teilnahme an der Studie galten folgende Ein- und Ausschlusskriterien:

Einschlusskriterien

- Freiwilligkeit
- männliches Geschlecht
- Alter von min. 18 Jahren und max. 50 Jahren
- Body-Mass-Index von 20 bis 32
- max. vom Probanden selbstständig und unabhängig von der Studie durchgeführter Trainingsumfang von ≤ 4 h/Woche

Ausschlusskriterien

- aktive und regelmäßige Teilnahme an sportlichen Wettkämpfen
- regelmäßige Einnahme von Nahrungsergänzungsmitteln, insbesondere folgender Präparate:
 - BCAA und andere AS-Präparate
 - Creatin
 - Proteinpulver (Molkenprotein, Sojaprotein etc.)
 - L-Carnitin
- von Studienverantwortlichen abhängige Personen
- anamnestische kardiovaskuläre Erkrankungen, insbesondere:
 - Zustand nach Myokardinfarkt
 - Zustand nach zerebrovaskulärem Ereignis
 - dekompensierte Herzinsuffizienz
 - akute Lungenarterienembolie
 - akute Aortendissektion
 - pulmonaler Hypertonus
 - schwerwiegende Herzrhythmusstörungen mit Symptomatik oder Einschränkung der Hämodynamik
 - therapierefraktärer arterieller Hypertonus
 - symptomatische oder hochgradige Klappenvitien
 - akute Phlebothrombose
 - akute Perimyokarditis
 - höhergradige periphere arterielle Verschlusskrankheit (Fontaine 2b oder höher)
 - nicht abgeklärte Dyspnoe, thorakale Schmerzsymptomatik oder Synkopen
 - sonstige floride Erkrankungsbilder
- anamnestische orthopädische Erkrankungen
 - akute Spondylodiszitis
 - akute Septische Arthritis
 - hochgradige Arthrosen
 - akuter Diskusprolaps
 - Zustand nach Eingriffen an den Gelenken in den letzten 12 Monaten
- andere anamnestische schwerwiegende Erkrankungsbilder
 - Leberinsuffizienz
 - renale Insuffizienz

3.2 Studiendesign

Vor Beginn der Studie wurde zur Gewährleistung einer möglichst standardisierten Ermittlung der Daten und Durchführung der Trainingsabläufe ein Ablaufplan entworfen (Abb. 6). Das Votum der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg wurde eingeholt (Bearbeitungsnummer: 2016-15).

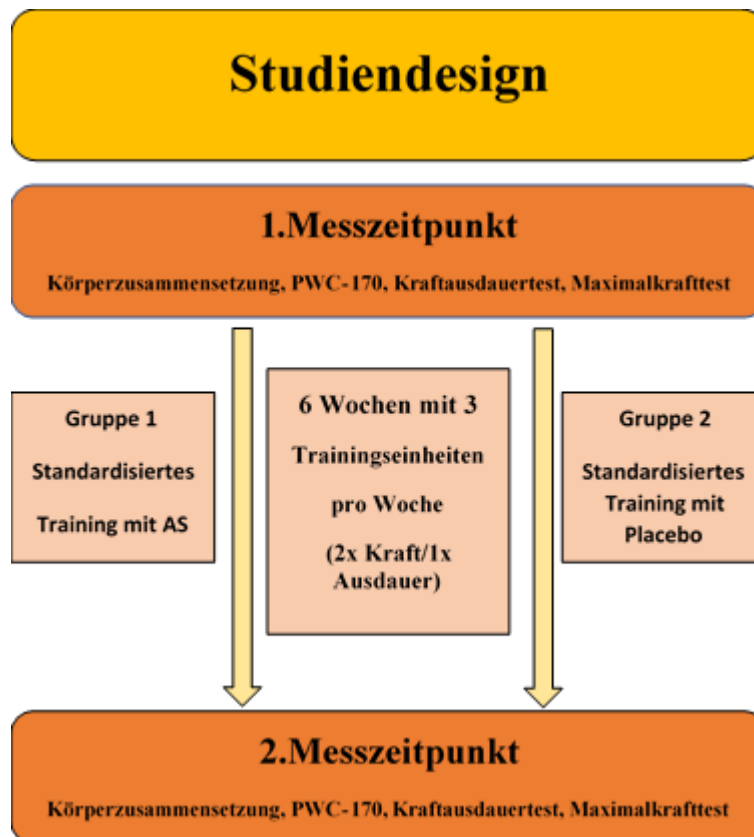


Abb. 6 – Studiendesign

Datenerhebung und Intervention begannen am 24.10.2016 und endeten am 7.12. 2016, was einem Zeitraum von 7 Wochen entspricht. Die Erfassung der Daten und die Trainingsintervention für jeden Probanden erstreckte sich über 6 Wochen. Die Differenz zwischen der Gesamtstudiendauer und der individuellen Datenerfassung der Teilnehmer erklärt sich durch den persönlich bedingten späteren Einstieg einiger Probanden. Alle bei Beginn eingeschlossenen Studienteilnehmer ($n = 44$) absolvierten vor Beginn der Trainingsintervention eine Leistungsdiagnostik (1. MZP = 1. Messzeitpunkt), um den aktuellen Zustand bezüglich der Körperzusammensetzung, der Maximal- und Kraftausdauerwerte sowie der Ausdauerleistungsfähigkeit zu dokumentieren. Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Leistungsdiagnostik findet sich in den Kapiteln 3.4 bis 3.6. Die Ermittlung der Leistungs- und Körperzusammensetzungsparameter erfolgte stets nach vorgegebener Reihenfolge: Nach initialer Messung der Körperzusammensetzung mittels

BIA wurde der PWC₁₇₀-Test durchgeführt. Erst nach dessen Beendigung erfolgte die Bestimmung der 1-RM und der maximalen Wiederholungszahl bei 60 %/1-RM an den jeweiligen Trainingsgeräten.

Darauffolgend wurden die Teilnehmer der Studie durch Randomisierung einer Verum-Gruppe (n = 21) und einer Placebo-Gruppe (n = 23) zugeordnet. Die Verum-Gruppe erhielt das AS-Präparat ‚Amino4U®‘ (Abb. 7) von der Firma Sveru Sport & Vertrieb GmbH mit Sitz in Halle (Saale). Die Placebo-Gruppe erhielt ein optisch identisches Präparat auf Basis von Cellulose ohne aktive Wirkstoffe. Die Dosierung und Einnahme der AS erfolgte nach einem festen Dosierungsplan. Abhängig von der beim MZP 1 ermittelten FFM wurden zur Anpassung an den gewichtsabhängigen Bedarf an AS 2 verschiedene Dosierungsgruppen gebildet (WHO/FAO/UNU, 2007) (Tab. 4). Die Einnahme wurde stets durch das Studienpersonal überwacht, zur Erleichterung des Schluckens durften Flüssigkeiten verwendet werden. An trainingsfreien Tagen erfolgten keine Vergabe und Einnahme der Präparate.



Abb. 7 – Präparat ‚Amino4U®‘

Folgende Inhaltsstoffe sind nach Herstellerangaben in dem Produkt ‚Amino4U®‘ enthalten: L-Leucin (19,64 %), L-Valin (16,57 %), L-Isoleucin (14,83 %), L-Lysin (14,29 %), L-Phenylalanin (12,89 %), L-Threonin (11,11 %), L-Methionin (6,99 %) und L-Tryptophan (3,68 %). Eine Tablette hat ein Gewicht von 1 g. Zusatzstoffe und Trägersubstanzen werden nicht verwendet.

Tab. 4 – Überblick über Gruppenzuordnung und Anzahl (n) eingenommener ‚Amino4U®‘-Tabletten anhand der FFM

	FFM < 69 kg	FFM > 69 kg
Einnahme n vor dem Training	3	6
Einnahme n nach dem Training	5	8

Abkürzungen: FFM = fettfreie Masse, kg = Kilogramm

Nach Abschluss der Eingangsdiagnostik und erfolgter Randomisierung begannen die Probanden ihr sechswöchiges Trainingsprogramm unter dauerhafter Betreuung durch das Studienpersonal in den Räumlichkeiten der Clever Fit GmbH Halle. Die Probanden führten ihr Training anhand eines vor Studienbeginn entworfenen Trainingsplanes durch (siehe Anhang), der ihnen zum ersten Trainingstermin schriftlich ausgehändigt wurde. Dabei sollten idealerweise pro Woche drei Trainingseinheiten absolviert werden, wovon zwei Einheiten als Kraftausdauertraining und eine Einheit als Ausdauertraining konzipiert waren (siehe 3.3). Die Trainingsgestaltung erfolgte in einem Belastungs-Erholungs-Rhythmus, sodass im optimalen Fall nach jeder Trainingseinheit mindestens ein Tag Erholungszeit eingeplant war. In Ausnahmefällen wurden zwei aufeinanderfolgende Trainingseinheiten vom Studienpersonal genehmigt, wenn vonseiten der Probanden aufgrund persönlicher oder beruflicher Gründe eine andere Planung nicht möglich war.

Zur individuellen Trainingsplanung wurde den Probanden die Möglichkeit gegeben, aus verschiedenen angebotenen Terminen zu wählen und sich für diese Zeitpunkte über das Cloud-Programm ‚Google Docs®‘ zu registrieren. Es wurden sowohl vormittags zwischen 9 und 12 Uhr als auch am Abend von 17 bis 20 Uhr wochentags und am Wochenende durch das Studienpersonal betreute Trainingseinheiten angeboten. Training im Rahmen der Studie fand außerhalb dieser vorgegebenen Zeiten nicht statt. Die erste Trainingswoche wurde als Einführungswoche geplant, während der vom Studienpersonal die Übungen des Trainingsplans theoretisch und praktisch erläutert sowie die Trainingsgeräte auf die Körpermaße der Probanden eingestellt wurden. Nach sechs Wochen Interventionsphase erfolgte ein zweiter MZP zur Erfassung der Leistungsentwicklung der Teilnehmer. Bei dieser Leistungsdiagnostik wurden nach dem exakt gleichen Schema wie beim ersten MZP die Körperzusammensetzung, Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsfähigkeit sowie die Maximalkraft erhoben.

3.3 Trainingsplan

Ausdauertrainingsplan

Pro Trainingswoche wurde von den Probanden eine in Bezug auf die Entwicklung der Ausdauerleistungsfähigkeit konzipierte Trainingseinheit durchgeführt. Die Dauer dieser Einheiten wurde mit ca. 70 bis 80 min veranschlagt. Die Trainingseinheiten wurden nach einem festen Schema durchgeführt (Abb. 8).

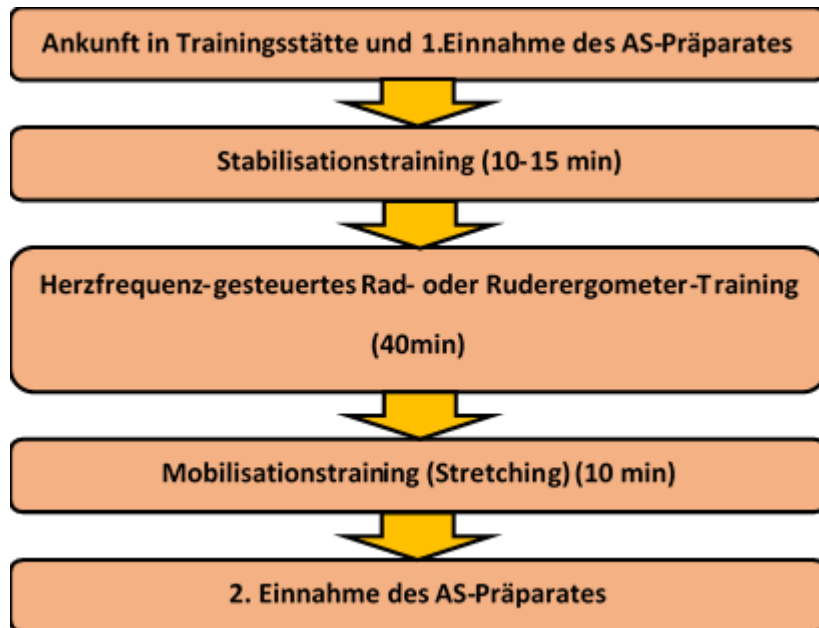


Abb. 8 – Ablaufschema Ausdauertraining

Da die Ein- und Ausschlusskriterien auch Probanden mit geringer bzw. fehlender Trainings- und Bewegungserfahrung vorsahen, wurde in den Ausdauertrainingsplan eine Stabilisationstrainingskomponente integriert (Abb. 8). Diese sollte bei den Teilnehmern Haltungs- und Bewegungsmotorik entwickeln, die Propriozeption fördern und die Grundlage für die Bewegungsabläufe der Kraftausdauerübungen legen. Den Probanden wurden zu diesem Zweck verschiedene isometrische Stabilisationsübungen vorgegeben, die nach Einweisung eigenverantwortlich durchgeführt wurden (Abb. 9-10).

Der Hauptteil der Ausdauertrainingseinheit bestand aus dem 40-minütigen Herzfrequenz-gesteuerten Rad- oder Ruderergometer-Training (Abb. 8), das im Modus eines Intervalltrainings mit alternierenden Belastungs- und Erholungsphasen durchgeführt wurde. Den Probanden wurde freigestellt, das Trainingsgerät selbst zu wählen. Während der 2- bis 3-minütigen Belastungsphasen wurden die Teilnehmer angewiesen, durch die gewählte Belastungsintensität eine Herzfrequenz von 170 bis 180 bpm zu erreichen und für den Zeitraum der Belastungsphase aufrechtzuerhalten. In den 4- bis 5-minütigen Erholungsphasen sollte durch die gewählte

Belastungsstufe eine Herzfrequenz von 120 bis 140 bpm erzielt und aufrechterhalten werden. Die Steuerung der Herzfrequenz erfolgte am Ruderergometer mittels des Herzfrequenzempfängers ‚RS800CX‘ der Firma Polar Electro GmbH (Büttelborn, Deutschland) (Abb. 17) und am Radergometer ‚95Ci‘ der Firma LifeFitness Europe GmbH (Unterschleißheim, Deutschland) mittels integriertem Pulsmessgerät. So sollten im Idealfall während der 40-minütigen Trainingsdauer fünf Belastungs-Erholungs-Zyklen durchlaufen werden.



Abb. 9 – Übung ‚Unterarmstütz‘ als isometrische Stabilisationsübung



Abb. 10 – Übung ‚Rückenstrecker‘ als isometrische Stabilisationsübung

Den Abschluss einer Ausdauertrainingseinheit bildete ein ca. 10-minütiges Mobilisationstraining mit diversen Dehnübungen und mit dem Ziel, die Beweglichkeit der Probanden nach einseitiger Ausdauerbelastung zu erhalten und zu fördern.

Kraftausdauertrainingsplan

Neben der zur Entwicklung der Ausdauerleistungsfähigkeit gestalteten Trainingseinheit absolvierten die Probanden zweimal wöchentlich ein 50 bis 80-minütiges Training mit dem Fokus im Kraftausdauerbereich (siehe Definition in Kapitel 3.6). Der Ablauf dieser Einheiten war den Teilnehmern, wie beim Ausdauertraining, nach einem festen Schema vorgegeben (Abb. 11). Das Kernelement, das eigentliche Kraftausdauertraining, war so konzipiert, dass die Probanden ein Zirkeltraining mit sechs verschiedenen Übungen durchliefen. Die Teilnehmer wurden jeweils anhand ihrer Erfahrung im Bereich Gerätetraining und Training an freien Gewichten einer von zwei möglichen Zirkelvarianten zugeordnet (siehe Anhang). Im grundsätzlichen Aufbau unterschieden sich die Zirkelvarianten nicht und es wurden jeweils identische Muskelgruppen durch die Übungen trainiert. Der Unterschied zwischen den Varianten bestand im vorgegebenen

Grad der Gelenkführung durch die Trainingsgeräte, um Verletzungen bei unerfahrenen Probanden vorzubeugen. Als Beispiel wurde zum Training des Musculus pectoralis major bei Teilnehmern mit geringer bzw. keiner Erfahrung die Übung Brustpresse am Trainingsgerät durchgeführt, wohingegen bei Probanden mit moderater bis ausgeprägter Trainingserfahrung die Übung freies Bankdrücken gewählt wurde (Abb. 20-21). Die Erfahrung der Studienteilnehmer im Krafttraining wurde bei Beginn der Studie durch kurze Interviews eruiert (siehe Anhang).

Das Trainingsgewicht sollte so gewählt werden, dass eine Mindestanzahl von 20 Wiederholungen in korrektem Bewegungsablauf möglich war. Zum Progress des Trainings wurden die Teilnehmer aufgefordert, bei Erreichen von 25 Wiederholungen in einem Trainingssatz die Belastung durch Erhöhung des Trainingsgewichtes zu intensivieren.

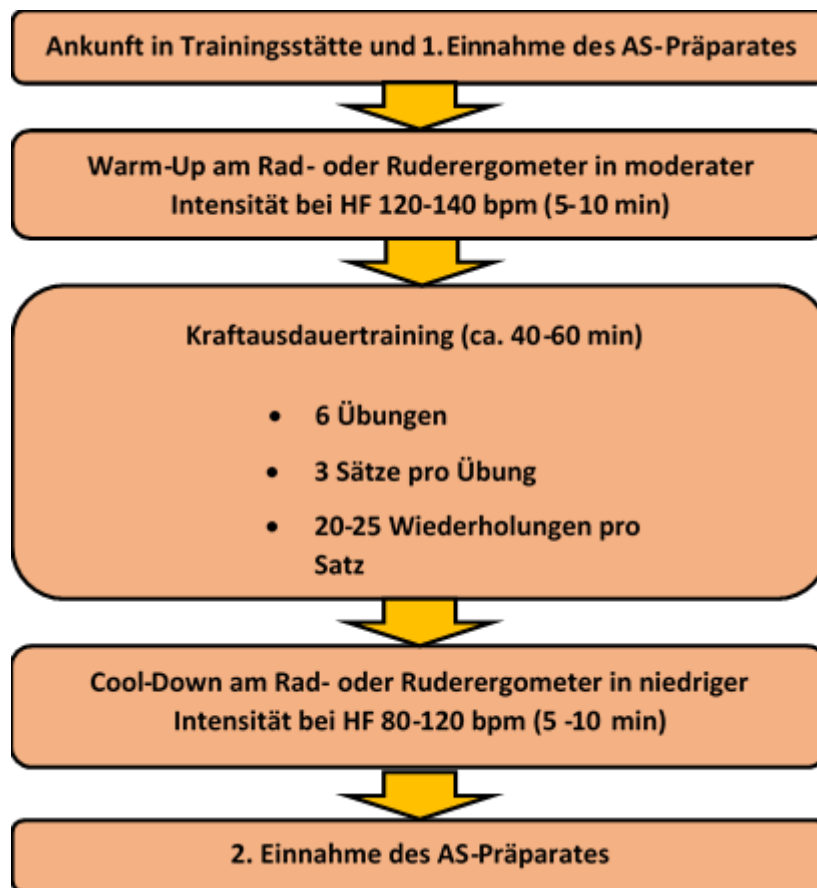


Abb. 11 – Ablaufschema Kraftausdauertrainingsplan

3.4 Messung der Körperzusammensetzung

Im Rahmen der Eingangs- (1. MZP) und Ausgangsdiagnostik (2. MZP) wurden bei allen Probanden die anthropometrischen Daten erhoben und die Körperzusammensetzung wurde gemessen. Die Erfassung der Körperhöhe erfolgte entweder nach Angabe der Teilnehmer oder, wenn nicht bekannt, mittels eines an der Wand befestigten Maßbandes.

Die Erfassung der Körperzusammensetzung basiert auf dem Kompartiment-Modell des menschlichen Körpers, das in verschiedenen Varianten existiert, die sich durch die Differenzierung der einzelnen Kompartimente voneinander unterscheiden (Abb. 12). Grundlegend wird das gesamte Körpergewicht in zwei Kompartimente unterteilt: FFM und FM. Die FFM kann noch weiter in extrazelluläre Masse und Körperzellmasse aufgeschlüsselt werden.

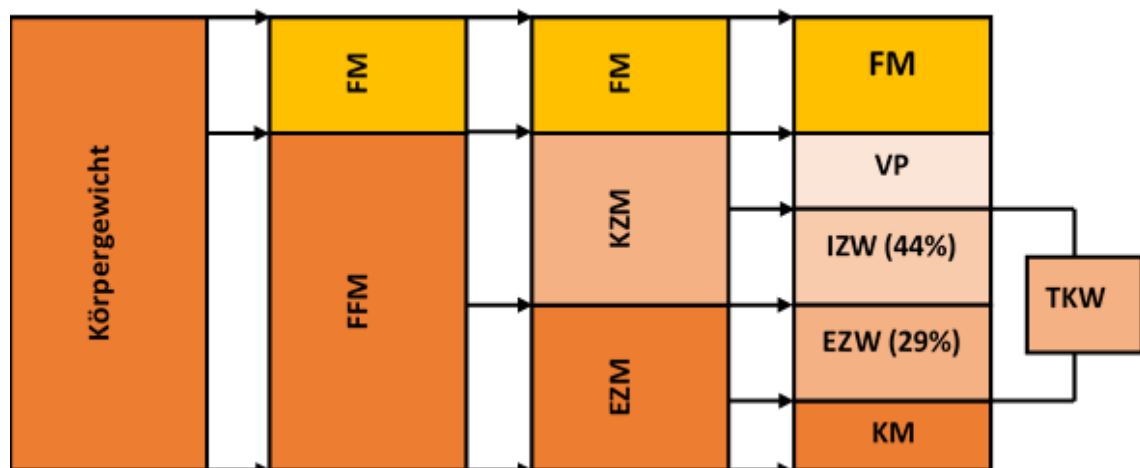


Abb. 12 – Das Kompartiment-Modell des menschlichen Körpers (modifiziert nach Kyle et al. 2004a)

Abkürzungen: Fettmasse (FM), fettfreie Masse (FFM), extrazelluläre Masse (EZM), Körperzellmasse (KZM), viszerales Protein (VP), intrazelluläres Wasser (IZW), extrazelluläres Wasser (EZW), Knochenminerale (KM), totales Körperwasser (TKW)

Bei der Steuerung eines physischen Trainings kann das Verhältnis von FFM/FM zur Beurteilung der Effektivität der Maßnahme genutzt werden (Sergi et al., 2017). Bei einer effizienten Trainingsgestaltung verschiebt sich das Verhältnis zugunsten des Zählers (FFM). Zur Evaluierung von FFM und FM wurde im Rahmen dieser Arbeit das Prinzip der BIA genutzt.

Die BIA ist eine doppelt indirekte Methode, die sich zur Messung der Körperkompartimente auf das oben erläuterte Modell stützt (Abb. 12). Damit dieses Modell für die Impedanzanalyse genutzt werden kann, müssen einige Grundannahmen konstatiert werden (Abb. 13) (Sergi et al., 2017):

- 1.) **Alle Teile des menschlichen Körpers werden vereinfacht als Zylinder wahrgenommen.**
- 2.) **Die FFM enthält virtuell jegliches Körperwasser.**
- 3.) **Der Anteil des Körperwassers an der FFM bleibt konstant.**
- 4.) **Die Körpergröße wird als Länge des leitenden Materials betrachtet.**

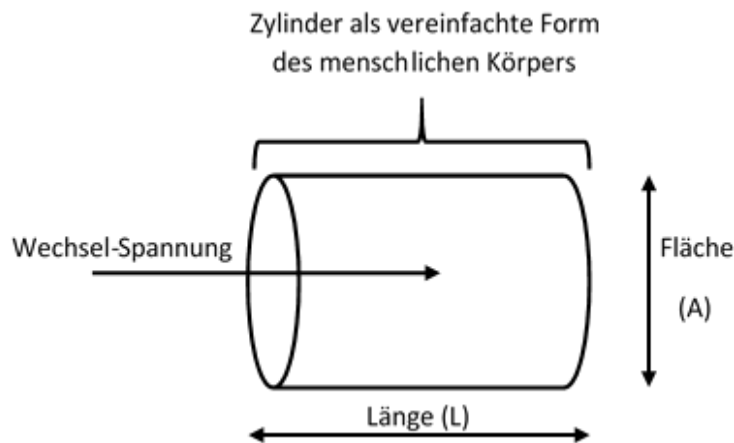


Abb. 13 – Grundannahmen der BIA (modifiziert nach Kyle et al. 2012)

Dass diese Grundannahmen nicht immer den Realbedingungen entsprechen, wird im Teil Methodendiskussion (siehe Kapitel 5.1) wieder aufgegriffen und diskutiert.

Durch Abgabe eines sinusoidalen Wechselstroms zwischen zwei am Körper befestigten Elektroden kann durch die Messung des Widerstands Z (Impedanz) das totale Körperwasser (V für Volumen) anhand der folgend aufgeführten Gleichungen bestimmt werden. Aufgrund der deutlich höheren Leitfähigkeit der FFM gegenüber der FM (da die FFM virtuell das gesamte Körperwasser und die leitenden Elektrolyte enthält) bezieht sich die Messung der Impedanz vor allem auf die FFM (Sergi et al., 2017).

Die Grundlage für diese Berechnung ist die Formel zur Bestimmung der Impedanz Z (Sergi et al., 2017):

$$Z = \rho L / A$$

Hierbei steht L für die Länge des leitenden Körpers, A für die Querschnittsfläche und ρ (Rho) für die Resistivität (spezifischer elektrischer Widerstand des Leiters, in diesem Fall menschliches Körpergewebe). Nach Umstellung und Einsetzung des Volumens V , ergibt sich folgende Gleichung, die die Grundlage für die Berechnung des totalen Körperwassers (hier Volumen V) darstellt (Sergi et al., 2017):

$$V = \rho L^2 / Z$$

Aus dem gemessenen Wert kann die FFM mittels der Annahme, dass das totale Körperwasser einen konstanten Anteil an der FFM besitzt, berechnet werden. Durch Subtraktion der FFM vom Körpergewicht kann schließlich die FM bestimmt werden (Eisenkölbl et al., 2001). Es gibt zur Messung der bioelektrischen Impedanz verschiedene Verfahren, die sich in der Anzahl der abgegebenen Frequenzen der Wechsellspannung (Single-Frequenz-BIA und Multi-Frequenz-BIA) unterscheiden (Kyle et al., 2004a). In der vorliegenden Arbeit wurde die Körperanalysewaage ‚BC-545N‘ der Firma Tanita Europe BV (Amsterdam, Niederlande) verwendet, die nach dem Prinzip der Multi-Frequenz-BIA funktioniert. Dies bedeutet, dass sie mehrere Frequenzen zur Analyse der Impedanz einsetzt, wodurch die Genauigkeit der Ermittlung zunimmt (Abb. 14).



Abb. 14 – Körperanalyzesystem Tanita ‚BC-545N‘
(Mit freundlicher Genehmigung der
Tanita Europe BV)



Abb. 15 – Testsituation bei der
Messung der Körperzusammensetzung
(Mit freundlicher Genehmigung der
Tanita Europe BV)

Aufgrund der möglichen Verfälschung der Impedanzmessung durch Textilien wurden die Probanden vor der Messung aufgefordert, die Socken auszuziehen. Des Weiteren wurden das Alter und das Geschlecht der Probanden in die Körperanalysewaage eingegeben, da die Gleichungen für die Berechnungen nach diesen Parametern validiert sind, um eine ausreichende Genauigkeit der Methode zu gewährleisten (Kyle et al., 2004b). Während der Messung wurde vom Studienpersonal sichergestellt, dass alle Finger die Handelektroden berühren, dass die Knie nicht gebeugt und die Arme komplett ausgestreckt sind sowie dass die Ellenbogen den Körper nicht berühren (Abb. 15) (Tanita Corporation, 2012). Die Messung der Körperzusammensetzung umfasste die Analyse des Wasseranteils (%), der FFM (kg), des Fettanteils (%) sowie des Körpergewichts (kg).

3.5 Messung der Ausdauerleistungsfähigkeit

Der Ist-Zustand der Ausdauerleistungsfähigkeit am MZP 1 sowie deren Entwicklung zum MZP 2 wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels PWC₁₇₀-Test am Fahrradergometer gemessen. Durch wiederholtes Ausdauertraining kommt es zu Adaptionen des kardiozirkulatorischen sowie des muskuloskelettalen Systems und damit der Sauerstofftransport- und Verarbeitungskapazität des Körpers, die vor allem vom Umfang und von der Intensität der Trainingsmaßnahmen abhängen. Funktionelle (nicht strukturelle) Anpassungsmechanismen, die bereits im Anfangsstadium des Trainings auftreten, werden von strukturellen Anpassungen, die erst nach Überschreitung individueller Grenzen bei der Trainingsgestaltung und nach mehrwöchigem Training vorkommen, unterschieden. Diese strukturellen Mechanismen sind nahezu ausschließlich im Leistungssportbereich vorhanden (Kindermann et al., 2007) und spielen daher in der vorliegenden Arbeit keine Rolle. Die funktionellen Anpassungen umfassen Reaktionen der Skelettmuskulatur, des metabolischen und des kardiovaskulären Systems. In der Skelettmuskulatur kommt es bereits nach wenigen ausdauerorientierten Trainingseinheiten zu einer Zunahme der Kapillarzahl pro Muskelfaser, einer Konzentrationserhöhung der Enzyme der aeroben Glykolyse und des Kohlenhydratstoffwechsels sowie einer erhöhten Anzahl an Mitochondrien im Sarkoplasma (Rivera-Brown und Frontera, 2012). Demzufolge steigt die Sauerstoffaufnahme- und Verwertungsfähigkeit der Muskulatur, was zu einem erhöhten parasymphatischen Tonus und einem verringerten Ansprechen auf Katecholamine führt. Kardial haben diese Entwicklungen eine Absenkung der Ruheherzfrequenz bei gleichzeitiger Zunahme des Schlagvolumens aufgrund verlängerter Füllungszeit zur Folge. Insgesamt kommt es so zu einer Ökonomisierung der Herzarbeit. Der leistungsfördernde Einfluss dieser relativ früh auftretenden funktionellen Anpassungen kann in Belastungsuntersuchungen nachgewiesen werden (Dickhuth et al., 2004).

Ein ergometrisches Belastungsschema, bei dem geschilderte Adaptionsmechanismen zur Überprüfung des Ausdauerleistungsvermögens eingesetzt werden, ist die von der Stockholmer Arbeitsgruppe um Wahlund (1948) eingeführte PWC. Diese ist definiert als die bei einer bestimmten Herzfrequenz erbrachte Leistung. Typischerweise werden hierbei Herzfrequenzen von 130 bpm, 150 bpm und 170 bpm als Bezugspunkte gewählt. Hierbei gilt, dass die erbrachte Leistung die absolute Leistungsfähigkeit umso präziser widerspiegelt, je höher die Bezugsfrequenz gewählt wird (Bringmann et al., 1990). Die Wahl der optimalen Bezugsfrequenz richtet sich nach der maximalen Herzfrequenz des Probandenkollektivs, die nach der folgenden rein zur Orientierung dienenden Formel berechnet wurde:

$$HF_{max} = 220 - \text{Alter}$$

Auf Basis dieser Formel und des Höchstalters von 35,6 Jahren im Probandenkollektiv wurde die PWC_{170} zur Messung der Ausdauerleistung verwendet.

Bei Belastung steigt die Herzfrequenz linear zur Intensität der Belastung an. Durch die Trainingsintervention wird nicht nur die Ruheherzfrequenz verringert, sondern auch der Anstieg der Frequenzreaktion unter Belastung, wodurch die submaximale PWC_{170} bei trainierten Personen erst bei höheren Leistungsanforderungen erreicht wird (Kindermann et al., 2007). Ein Vorteil der submaximalen Herzfrequenzerfassung liegt in der Unabhängigkeit von vollständiger Ausbelastung und damit auch von der Tagesform, Motivation und Untersuchereinstellung (Kindermann et al., 2007). Bei gesunden Probanden zwischen 20 und 40 Jahren, wie dem hier vorliegenden Probandenkollektiv, entspricht die PWC_{170} annähernd der maximalen Leistungsfähigkeit (Löllgen et al., 2010b). Vor Beginn des PWC_{170} -Tests wurden die Teilnehmer aufgefordert, für 5 min auf einem Stuhl Platz zu nehmen und unnötige Bewegungen sowie Sprechen zu vermeiden. Am Ende dieser 5-minütigen Ruhephase wurde die Ruheherzfrequenz (in bpm) mittels des Herzfrequenzempfängers ‚RS800CX‘ der Firma Polar Electro GmbH (Büttelborn, Deutschland) gemessen (Abb. 17). Die Analyse der Herzfrequenz in Ruhe wie auch in Belastung erfolgte über den zum Polar ‚RS800CX‘ zugehörigen ‚H3 Herzfrequenz-Sensor‘, der durch einen Befestigungsgurt (sog. ‚Wearlink‘) median zwischen den Mamillen des Probanden befestigt wurde (Abb. 16). Vor der Benutzung wurden die Registrierungselektroden des Herzfrequenz-Sensors mit Wasser befeuchtet, um die Übertragung des elektrischen Signals der Herzaktivität zu optimieren.



Abb. 16 – H3 Herzfrequenz-Sensor und dazugehörige Befestigung mittels ‚Wearlink‘



Abb. 17 – Herzfrequenzempfänger Polar ‚RS800CX‘

Vor Beginn der Belastungsuntersuchung wurden die Sattelhöhe und die Körperposition der Probanden an das Ergometer ‚95Ci‘ der Firma LifeFitness Europe GmbH (Unterschleißheim, Deutschland) angepasst und notiert, sodass bei den Messungen zum MZP 1 und MZP 2 jeweils die gleiche Sattelhöhe und Körperposition verwendet werden konnte (siehe 5.1). Die Studienteilnehmer wurden dann aufgefordert, nach einem vorgegebenen Belastungsschema (Abb. 18) unter Aufsicht des Studienpersonals bei konstanter Kadenz von 90 Umdrehungen/min. den PWC₁₇₀-Test auf dem Ergometer zu absolvieren. Die Dauer einer jeweiligen Belastungsstufe wurde auf 2 min festgelegt. Diese Zeit wurde als Kompromiss gewählt, um ein Steady-State der Herzfrequenz (Zustand konstanter Herzfrequenz) in der jeweiligen Belastungsstufe zu erreichen (Kindermann et al., 2007) und gleichzeitig die Dauer der Belastung nicht unnötig zu verlängern, damit eine vorzeitige Ermüdung des Musculus quadriceps femoris als leistungsbegrenzender Faktor möglichst vermieden werden konnte. Die Belastung während des PWC₁₇₀-Tests wurde stets mit einer kurzen Erwärmung bei 64 W begonnen und dann stufenförmig alle 2 min bis zum Erreichen der Herzfrequenz von 170 bpm erhöht. Beim Erreichen der Zielherzfrequenz wurden die Dauer und die erreichte Belastungsstufe inklusive der Wattleistung notiert. Die bereits begonnene Belastungsstufe wurde von den Probanden noch beendet, woraufhin sich eine weitere Belastungsstufe (sog. Erholungsstufe) mit niedriger Intensität (50 W) zur Messung der Herzfrequenz am Ende der Stufe anschloss. Dies wurde durchgeführt, um die kardiovaskuläre Regulationsfähigkeit der Teilnehmer im Anschluss an die Belastung zu bewerten (sog. Erholungsherzfrequenz).

Bei Auftreten von klinischen Symptomen wie Schwindel, Zyanose, Blässe, Kaltschweißigkeit, Dyspnoe, als Zeichen kardialer Dekompensation, oder bei muskulärer Erschöpfung wäre die Belastungsuntersuchung durch das Studienpersonal vorzeitig abgebrochen worden (Bringmann et al., 1990). Diese Kriterien traten bei den Untersuchungen bei keinem der Probanden auf. Die Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention empfiehlt vor einer Belastungsuntersuchung die Durchführung eines Ruhe-Elektrokardiogramm ab einem Alter von 35 Jahren (Lollgen und Hansel, 2007). Da lediglich ein Proband dieses Alter mit 35,6 Jahren zum Zeitpunkt der Untersuchung geringfügig überschritten hatte, wurde auf diese Maßnahme verzichtet.

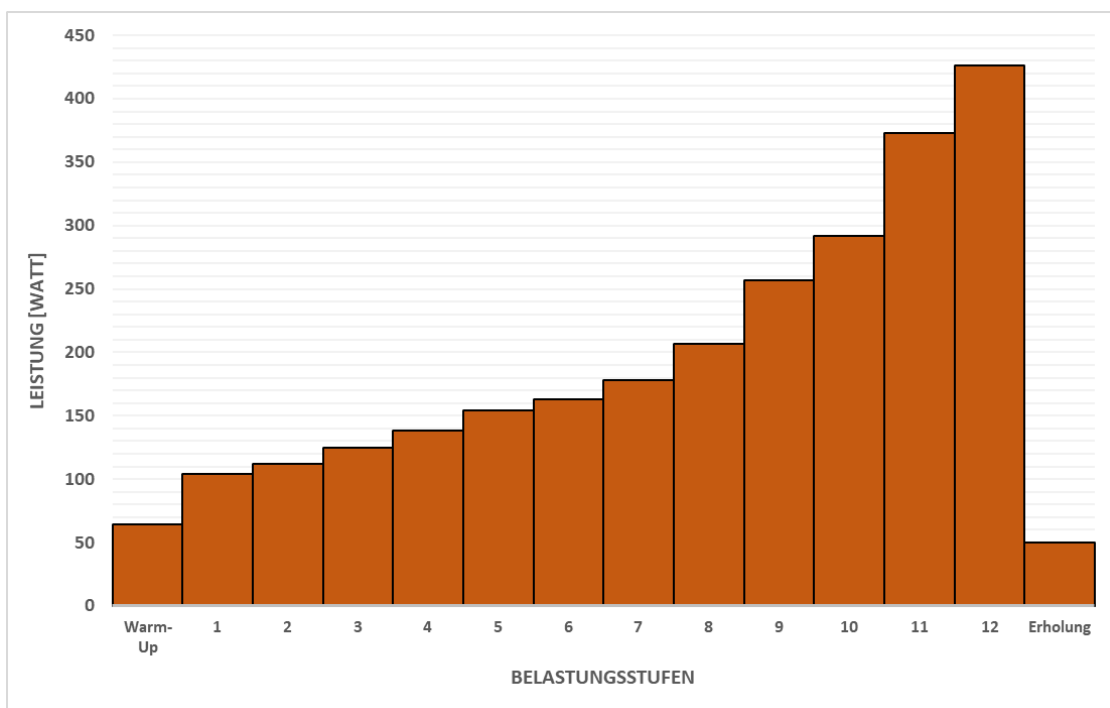


Abb. 18 – PWC₁₇₀-Belastungsprotokoll am Radergometer ,95Ci‘ (Dauer der Stufen jeweils 2 min)

3.6 Messung der Maximalkraft und der Kraftausdauer

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde neben der Ausdauerleistungsfähigkeit auch der Einfluss von EAA in Kombination mit einem Kraft- und Ausdauertraining auf die Parameter der Maximalkraft und Kraftausdauer untersucht. Diesbezüglich sind zunächst eine Begriffsklärung und eine Abgrenzung der Begriffe voneinander notwendig. Kraft kann im biologischen Sinne im Sport in vier Varianten auftreten: als Maximalkraft, als Schnellkraft, als Reaktivkraft und als Kraftausdauer (Grosser et al., 2004).

Anhand der resultierenden Längenänderung des sich kontrahierenden Muskels werden diese Varianten in dynamisch-konzentrisch (Muskelverkürzung unter Kontraktion), dynamisch-exzentrisch (Muskelverlängerung unter Kontraktion) und isometrisch/statisch (konstante Muskellänge unter Kontraktion) weiter differenziert (Grosser et al., 2004).

Die **Maximalkraft** wird von Ehlenz et al. (1998, S. 67) folgendermaßen definiert:

Die Maximalkraft ist die größtmögliche Kraft, die willkürlich gegen einen Widerstand ausgeübt werden kann; sie tritt sowohl in isometrischen als auch in dynamisch-konzentrischen Maximalkontraktionen auf [...].

Der Begriff der **Kraftausdauer** wird von ebendiesen Autoren wie folgt beschrieben

(Ehlenz et al., 1998, S. 71):

Kraftausdauer ist die von der Maximalkraft abhängige Ermüdungswiderstandsfähigkeit gegen lang dauernde oder sich wiederholende Belastungen bei statischer oder dynamischer Muskelarbeitsweise.

In den genannten Definitionen zeigt sich, dass eine Messung der Kraftausdauer nicht ohne eine gleichzeitige Messung der Maximalkraft als Bezugsparameter sinnvoll durchgeführt werden kann. Die Erfassung der Maximalkraft- wie auch der Kraftausdauerwerte erfolgte in der vorliegenden Arbeit mittels eines standardisierten Untersuchungsprotokolls an drei Trainingsgeräten (Bankdrücken, Latzug, Beinpresse) sowohl zum ersten MZP als auch zum zweiten MZP. Die Messung der Maximalkraft und der Kraftausdauer erfolgten bei beiden MZP stets im Anschluss an die Testung auf dem Fahrradergometer, sodass auf eine weitere

kardiovaskuläre Erwärmung verzichtet werden konnte. Vor jeder Maximalkrafttestung absolvierten die Probanden ein muskelspezifisches Erwärmungsschema (Abb. 19) zur Vorbereitung der getesteten Muskelgruppe am jeweiligen Gerät. Insgesamt wurden den Teilnehmern nach der Erwärmung jeweils drei 1-RM-Versuche ermöglicht, wobei der höchste korrekt und erfolgreich ausgeführte Durchlauf gewertet und in die Datenerfassung aufgenommen wurde. Zwischen den Maximalkraftversuchen wurde vom Studienpersonal auf die Einhaltung einer mindestens 2-minütigen Pause geachtet. Die initiale Einschätzung des Erwärmungsgewichtes (Abb. 19) erfolgte subjektiv durch das Studienpersonal und wurde im Verlauf des Erwärmungszyklus nach Feedback der Probanden angepasst.

Bei den Maximalkraftversuchen wurden die Teilnehmer instruiert, die Bewegung mit maximaler willkürlicher Kraft und Geschwindigkeit auszuführen, da erwiesenermaßen der Versuch, die Bewegung zu verlangsamen oder kontrolliert auszuführen, in einer geringeren gemessenen Maximalkraft resultiert (Kraemer et al., 2006).

Auf die Erfassung der Maximalkraft folgte die Messung der Kraftausdauer an demselben Trainingsgerät. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Kraftausdauer tests bei 60 % des Belastungsgewichts der vom Probanden erzielten 1-RM durchgeführt. Ziel der Erfassung der Kraftausdauer war eine möglichst hohe Anzahl an korrekt ausgeführten Wiederholungen mit gegebenem Gewicht bei gleichbleibender Bewegungsgeschwindigkeit. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, das für sie individuell anhand der 1-RM berechnete Gewicht nach einem akustischen Rhythmus zu bewegen, der für die konzentrische und exzentrische Phase der Bewegung jeweils die Dauer von 1 s vorgab. Bei deutlich wahrnehmbarer Verringerung der Bewegungsgeschwindigkeit und bei zunehmend inkorrekt er Übungsausführung wurde die Messung beendet und die Anzahl korrekt ausgeführter Wiederholungen notiert.

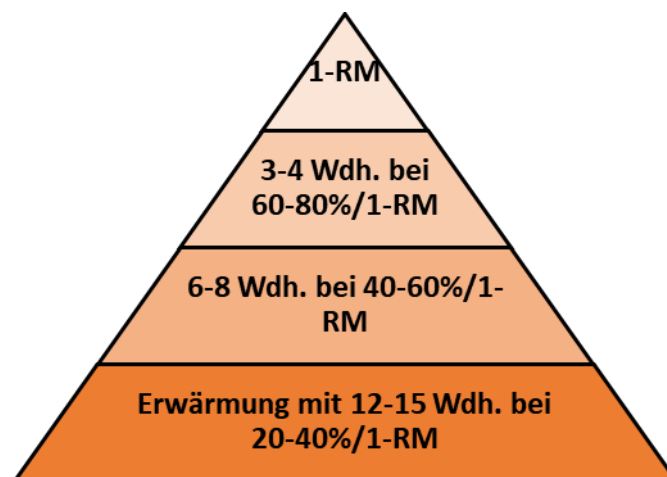


Abb. 19 – Erwärmungsschema Maximalkrafttestung
Abkürzungen: 1-RM (1-Wiederholung Maximalkraft), Wdh.
(Wiederholungen)

Die erste Übung zur Messung von Maximalkraft und Kraftausdauer war das Bankdrücken. In Abb. 20 und Abb. 21 sind exemplarisch die korrekte Übungsausführung und die im Übungsprotokoll festgehaltene Körperhaltung und Griffposition dargestellt. Die Hände griffen etwa 5-10 cm breiter als die Breite der Schultern und die Daumen der Probanden umschlossen die Langhantel, während die Fußsohlen stets Bodenkontakt hielten. Der korrekte Bewegungsumfang war dann erreicht, wenn die Langhantel in einem leichten Bogen auf die Mamillen des Teilnehmers abgesenkt wurde. Aus dieser Position wurde das Gewicht in die Ausgangsstellung zurückgedrückt. Während der konzentrischen Kontraktionsphase sollten die Probanden expirieren, um den Bewegungsablauf zu unterstützen. Wenn ein Hohlkreuz im unteren Rücken auftrat, wurde dies als Fehlversuch gewertet.



Abb. 20 – Bankdrücken Umkehrpunkt



Abb. 21 – Bankdrücken Ausgangsstellung

Auf die Übung Bankdrücken folgte die Übung Latzug. Der grundsätzliche Bewegungsablauf und die Körperhaltung sowie die Griffposition sind auf Abb. 22 und Abb. 23 dargestellt. Die Hände griffen an der äußeren Seite der Latzugstange und die Daumen umfassten diese zeitgleich. Die Stange wurde dann hinter den Kopf des Probanden geführt. Der volle Bewegungsumfang war erreicht, wenn sich die Stange, wie in Abb. 22 zu sehen, auf Höhe der Ohren befand. Die Teilnehmer wurden darauf hingewiesen, dass für eine korrekte Ausführung der Übung eine Beugung des Oberkörpers nicht zulässig sei. Die Expiration sollte während der konzentrischen Phase des Bewegungsablaufes erfolgen.



Abb. 22 – Latzug Umkehrpunkt



Abb. 23 – Latzug Ausgangsstellung

Als letzte Übung zur Überprüfung der Maximalkraft und Kraftausdauer wurde die Beinpresse getestet. Der korrekte Bewegungsablauf, Fußstellung und Körperhaltung sind auf Abb. 24 und Abb. 25 exemplarisch zu sehen.



Abb. 24 – Beinpresse Ausgangsstellung



Abb. 25 – Beinpresse Umkehrpunkt

Der Bewegungsumfang wurde so im Protokoll festgelegt, dass die Kniegelenke in der Ausgangsstellung ca. 5° und im Umkehrpunkt ca. $90\text{-}95^\circ$ gebeugt waren. Ein geringerer Bewegungsumfang bei der Durchführung wurde als Fehlversuch gewertet. Die Hände des Probanden mussten sich während der Übung, wie in den Abbildungen zu sehen, an den Griffen befinden und durften nicht zur Unterstützung der Beinbewegung eingesetzt werden. Wie auch in den vorher beschriebenen Übungen wurden die Probanden angehalten, während der konzentrischen Kontraktionsphase zu expirieren.

3.7 Statistische Analyse

Die während der Studie erhobenen Daten wurden zunächst mittels des Tabellenkalkulationsprogramms ‚Excel®‘ der Firma Microsoft (Redmond, Washington, USA) deskriptiv erfasst. Die statistische Analyse des Datenmaterials erfolgte mit dem Statistikprogramm ‚SPSS®‘ der Firma IBM (Armonk, New York, USA) in der Version 22.0. Es wurden zunächst Mittelwerte, SD sowie Minima und Maxima berechnet. Anschließend wurde eine zweifaktorielle (Zeit, Gruppe), univariate Varianzanalyse durchgeführt, um die Effekte in der Interventionsphase beurteilen zu können. Auftretende Interaktionseffekte (Zeit x Gruppe) wurden auf der Basis eines allgemeinen linearen Modells berechnet. Als statistisch signifikant wurden, in Abhängigkeit von der Stichprobengröße, Effekte mit $p < 0,05$ oder $\eta^2 \geq 0,20$ (α - und β -Fehler-Signifikanzniveau) bezeichnet.

4 Ergebnisse

Von den insgesamt 44 in die Untersuchung eingeschlossenen Probanden konnten 38 die Studie erfolgreich beenden und nach Auswertung der Trainingstagebücher die notwendige Anzahl an Trainingseinheiten (mindestens 17 von 18 Einheiten) aufweisen. In den folgenden Abschnitten erfolgt eine gruppenspezifische Auswertung (Interventionsgruppe (Verabreichung von AS) versus Kontrollgruppe (Verabreichung von Placebopräparaten)) über die Zeit.

4.1 Körperzusammensetzung

Die Analyse der konstitutionellen Parameter des Probandenkollektivs ergab keine statistisch signifikante unterschiedliche Entwicklung im Vergleich zwischen Interventions- und Kontrollgruppe über die Zeit. Im Längsschnittvergleich konnte kein Interaktionseffekt hinsichtlich der untersuchten Parameter Körperfettanteil, FFM, Wasseranteil und Gewicht ermittelt werden ($p > 0,304$) (Tab. 5). Ein Zeiteffekt konnte bezüglich des Körpergewichts ($p = 0,017$, $\eta^2 = 0,171$) und FFM ($p = 0,042$, $\eta^2 = 0,130$) nachgewiesen werden.

Tab. 5 – Deskriptive Untersuchungsergebnisse sowie Varianzanalyse über die Parameter der Körperzusammensetzung in der Aminogruppe ($n = 16$) und der Placebogruppe ($n = 16$ bzw. 17) nach Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung.

Parameter	Deskriptive Statistik		Varianzanalyse
	MZP 1 (MW \pm SD)	MZP 2 (MW \pm SD)	MZP 1-2 (Zeit*Gruppe) p (η^2)
Körperzusammensetzung			
Gewicht [kg]			
Amino (n=16)	80,4 \pm 8,03	80,9 \pm 7,94	0,304 (0,034)
Placebo (n=16)	87,9 \pm 17,0	89,0 \pm 12,4	
Körperfettanteil [%]			
Amino (n=16)	14,6 \pm 2,03	14,1 \pm 3,44	0,459 (0,018)
Placebo (n=16)	17,3 \pm 4,00	17,5 \pm 4,02	
Fettfreie Masse [kg]			
Amino (n=16)	65,2 \pm 7,11	65,9 \pm 7,71	0,509 (0,010)
Placebo (n=16)	66,7 \pm 8,84	67,9 \pm 7,60	
Wasseranteil [%]			
Amino (n=16)	60,5 \pm 1,94	60,7 \pm 2,64	0,766 (0,003)
Placebo (n=16)	58,7 \pm 3,53	58,7 \pm 3,52	

Abkürzungen: MZP = Messzeitpunkt, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

4.2 Ausdauerleistungsfähigkeit

Bei der Längsschnitt-Betrachtung der Ausdauerleistungsfähigkeit von Interventions- und Kontrollgruppe konnte kein Interaktionseffekt bei Ruheherzfrequenz, Erholungsherzfrequenz und PWC-Leistung nachgewiesen werden ($p > 0,100$) (Tab. 6). Zeiteffekte wurden in den Parametern Erholungsherzfrequenz ($p = 0,001$, $\eta^2 = 0,348$) sowie PWC-Leistung ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,491$) beobachtet.

Tab. 6 – Deskriptive Untersuchungsergebnisse sowie Varianzanalyse über Parameter der Ausdauerleistungsfähigkeit in der Aminogruppe ($n = 15$ bzw. 14) und der Placebogruppe ($n = 18$ bzw. 15) nach Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung.

Parameter	Deskriptive Statistik		Varianzanalyse
	MZP 1 (MW \pm SD)	MZP 2 (MW \pm SD)	MZP 1-2 (Zeit*Gruppe) p (η^2)
Ausdauerleistungsfähigkeit			
Ruheherzfrequenz [1/min]			
Amino (n=15)	79,1 \pm 10,3	76,0 \pm 8,81	0,584 (0,010)
Placebo (n=18)	81,1 \pm 9,52	80,7 \pm 14,9	
Erholungsherzfrequenz [1/min]			
Amino (n=15)	25,7 \pm 8,97	31,8 \pm 6,65	0,129 (0,080)
Placebo (n=15)	32,5 \pm 7,61	35,1 \pm 7,61	
PWC-Leistung [W/kg]			
Amino (n=14)	2,65 \pm 0,60	2,87 \pm 0,45	0,100 (0,080)
Placebo (n=18)	2,71 \pm 0,62	3,15 \pm 0,54	

Abkürzungen: MZP = Messzeitpunkt, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

4.3 Maximalkraft

Für den Längsschnittvergleich der Interventions- und Kontrollgruppe konnte in der Testübung Beinpresse ein Interaktionseffekt ermittelt werden ($p = 0,036$ und $\eta^2 = 0,148$). Bei den Übungen Latzug ($p = 0,114$ und $\eta^2 = 0,079$) und Bankdrücken ($p = 0,418$ und $\eta^2 = 0,022$) blieb ein Interaktionseffekt aus (Tab. 7). Zeiteffekte konnten bei allen zur Messung der Maximalkraft herangezogenen Übungen (Bankdrücken ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,481$), Latzug ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,558$) und Beinpresse ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,706$)) nachgewiesen werden.

Tab. 7 – Deskriptive Untersuchungsergebnisse sowie Varianzanalyse über Parameter der Maximalkraft in der Aminogruppe (n = 15 bzw. 18) und Placebogruppe (n = 17 bzw. 18 bzw. 20) nach Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung.

Parameter	Deskriptive Statistik		Varianzanalyse
	MZP 1 (MW ± SD)	MZP 2 (MW ± SD)	MZP 1-2 (Zeit*Gruppe) p (η ²)
Maximalkraft			
Bankdrücken [kg]			
Amino (n=15)	67,4 ± 8,81	72,9 ± 10,2	0,418 (0,022)
Placebo (n=17)	73,0 ± 16,2	77,0 ± 15,5	
Latzug [kg]			
Amino (n=15)	36,3 ± 4,34	40,6 ± 5,04	0,114 (0,079)
Placebo (n=18)	39,1 ± 6,92	41,6 ± 7,41	
Beinpresse [kg]			
Amino (n=18)	251 ± 46,7	295 ± 39,9	0,036 (0,148)
Placebo (n=20)	268 ± 41,2	293 ± 42,9	

Abkürzungen: MZP = Messzeitpunkt, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

4.4 Kraftausdauer

Im Längsschnittvergleich von Interventions- und Kontrollgruppe konnte kein Interaktionseffekt in den zur Erfassung der Kraftausdauer genutzten Übungen Bankdrücken, Latzug und Beinpresse nachgewiesen werden ($p > 0,174$) (Tab. 8). Zeiteffekte hingegen wurden in allen Übungen ermittelt (Bankdrücken ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,520$), Latzug ($p = 0,002$, $\eta^2 = 0,289$) und Beinpresse ($p = 0,038$, $\eta^2 = 0,162$)).

Auch bei Umrechnung der Anzahl der Wiederholungen in bewegte Tonnage (in kg) konnte im Längsschnittvergleich von Interventions- und Kontrollgruppe kein Interaktionseffekt beobachtet werden ($p > 0,333$) (Tab. 9). Zeiteffekte zeigten sich bei allen untersuchten Übungen (Bankdrücken ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,615$), Latzug ($p < 0,001$, $\eta^2 = 0,572$) und Beinpresse ($p = 0,002$, $\eta^2 = 0,343$)).

Tab. 8 – Deskriptive Untersuchungsergebnisse sowie Varianzanalyse über Parameter der Kraftausdauer in der Aminogruppe (n = 14 bzw. 13) und der Placebogruppe (n = 17 bzw. 16 bzw. 14) nach Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung.

Parameter	Deskriptive Statistik		Varianzanalyse
	MZP 1 (MW ± SD)	MZP 2 (MW ± SD)	MZP 1-2 (Zeit*Gruppe) p (η²)
Kraftausdauer			
Bankdrücken [n]			
Amino (n = 14)	13,5 ± 2,07	16,9 ± 2,83	0,719 (0,005)
Placebo (n = 17)	12,9 ± 2,03	16,7 ± 3,26	
Latzug [n]			
Amino (n = 14)	21,8 ± 3,91	24,8 ± 3,75	0,731 (0,004)
Placebo (n = 16)	21,6 ± 5,51	25,3 ± 3,49	
Beinpresse [n]			
Amino (n = 13)	21,5 ± 4,91	22,6 ± 6,04	0,174 (0,073)
Placebo (n = 14)	19,8 ± 4,42	25,0 ± 7,49	

Abkürzungen: MZP = Messzeitpunkt, MW = Mittelwert, SD = Standardabweichung

Tab. 9 - Deskriptive Untersuchungsergebnisse sowie Varianzanalyse über Parameter der Tonnage in der Aminogruppe (n = 15 bzw. 13) und Placebogruppe (n = 16 bzw. 13) nach Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung.

Parameter	Deskriptive Statistik		Varianzanalyse
	MZP 1 (MW ± SD)	MZP 2 (MW ± SD)	MZP 1-2 (Zeit*Gruppe) p (η²)
Tonnage			
Bankdrücken [kg]			
Amino (n=15)	525 ± 135	723 ± 174	0,686 (0,006)
Placebo (n=16)	571 ± 194	747 ± 169	
Latzug [kg]			
Amino (n=15)	468 ± 118	596 ± 115	0,785 (0,003)
Placebo (n=16)	483 ± 129	623 ± 119	
Beinpresse [kg]			
Amino (n=13)	3464 ± 925	4117 ± 1286	0,333 (0,039)
Placebo (n=13)	3452 ± 850	4609 ± 1333	

Abkürzungen: MZP=Messzeitpunkt, MW= Mittelwert, SD=Standardabweichung

5 Diskussion

5.1 Methodendiskussion und Limitationen

Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv in der vorliegenden Untersuchung bestand aus jungen, gesunden männlichen Nicht- und Freizeitsportlern. Diese relativ homogene Gruppe wurde gewählt, um den Einfluss von Störvariablen, wie Geschlecht, Hormonstatus, Alter und Vorerkrankungen, auf die Untersuchungsparameter zu minimieren. Dennoch verbleibt innerhalb der Einschlusskriterien sowohl hinsichtlich der bisherigen Trainingserfahrung als auch des selbstständigen Trainingsumfangs eine gewisse Varianz, die die teilweise auftretenden Extremwerte erklären könnte (siehe 4). Ursprünglich war geplant, die Studie mit einer Gruppe von Leistungssportlern durchzuführen, um eine weitere Homogenisierung des Kollektivs zu erreichen und den Einfluss neuronaler Lernprozesse zu minimieren (siehe 1.6). Jedoch wäre die Gleichschaltung von Trainingsinhalten über einen längeren Zeitraum bei Leistungssportlern mit deren eigenen Trainingsinhalten problematisch bis unmöglich, weshalb stattdessen ein Kollektiv von Freizeit- und Nicht-Sportlern untersucht wurde. In ähnlichen Arbeiten konnten relevante Unterschiede bereits in kleineren Kollektiven mit ca. 20 Probanden nachgewiesen werden (Hottenrott und Neumann, 2006; Hoffman et al., 2007). Allerdings zeigen die Ausführungen der Einleitung auch auf (siehe 1.6), dass der zu erwartende Einfluss der Supplementierung vermutlich gering bis moderat ausfällt. Daher wurde ein größeres Kollektiv mit 44 Probanden gewählt, um auch kleine Unterschiede statistisch nachweisen zu können.

Messung der Körperzusammensetzung

Es stehen verschiedene Methoden zur Messung der Körperzusammensetzung zur Verfügung, die sich vor allem durch Invasivität, Verfügbarkeit, Kosten, Zeit- sowie Personalaufwand unterscheiden. Die bedeutsamsten eingesetzten Verfahren sind die Anthropometrie, die Hautfaltendicken-Messung, die Hydrodensitometrie, die Neutronenaktivierungsanalyse, die Magnetresonanztomografie, die Computertomografie, die Dual-Energy X-Ray-Absorptiometry sowie die hier eingesetzte BIA (Thibault et al., 2012). Hinsichtlich der Genauigkeit bei der Messung der Körperzusammensetzung stellt die Dual-Energy X-Ray-Absorptiometry die Referenzmethode dar. Trotz ihrer hohen Genauigkeit ist die Einsatzmöglichkeit limitiert, was im hohen Zeitaufwand, den Kosten und der Exposition gegenüber potenziell schädlicher Strahlung begründet liegt (Sergi et al., 2017). Ein Messverfahren, das für die Analyse der Körperzusammensetzung in einer Längsschnittstudie, wie der hier vorliegenden Arbeit, eingesetzt wird, sollte im Idealfall relativ kostengünstig und mit geringem Aufwand für die Probanden verbunden sein. Auch sollte es problemlos von nicht ausgebildeten Anwendern durchgeführt werden können sowie eine hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse

bieten. Ein Verfahren, das am ehesten diesen Kriterien entspricht, ist die BIA (Ward, 2012). Aus diesen Gründen und aufgrund des Fehlens potenziell schädlicher Strahlung wurde die BIA in dieser Studie als Methode zur Messung der Körperzusammensetzung gewählt. Auch in groß angelegten Kohortenstudien, wie NHANES (USA), MONICA (Dänemark) und NUGENOB (Europa) wurde die BIA bereits vielfach erfolgreich eingesetzt (Böhm und Heitmann, 2013). Sie ist der Referenzmethode Dual-Energy X-Ray-Absorptiometry und anderen Methoden, wie Computer- und Magnetresonanztomografie, bezüglich der Messgenauigkeit unterlegen. Dies ist jedoch in longitudinal konzipierten Untersuchungen, wie dieser Studie, bei denen eine Änderung der Körperzusammensetzung über einen Zeitverlauf evaluiert werden soll, von untergeordneter Relevanz. Bei longitudinalen Studien ist eine unkomplizierte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und eine hohe Retest-Reliabilität, wie sie die BIA bietet, erforderlich (Ward, 2012). Wie in Kapitel 3.4 besprochen, basiert die BIA auf modellhaften Grundüberlegungen, die den Einsatz bei bestimmten Personengruppen limitieren. Im Gegensatz zu den Modellannahmen ist der Hydratisierungsstatus real nicht konstant und von verschiedenen Faktoren abhängig. Sowohl pathologische Aspekte, wie Nieren-, Leber- und Herzinsuffizienz, als auch die vorherige Flüssigkeits- und Nahrungsaufnahme oder eine gefüllte Harnblase können zu einer Verminderung der Impedanz führen, woraus eine Überschätzung der FFM resultiert (Sergi et al., 2017). Pathologische Zustände trafen auf das Probandenkollektiv dieser Arbeit nicht zu. Kyle et al. (2004b) empfehlen in ihrer Übersichtsarbeit, vor der Impedanzanalyse eine Fastenzeit von ca. 8 h einzuhalten, um den Einfluss von Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme auf die Impedanz zu minimieren. Diese Empfehlung wurde in der vorliegenden Arbeit nicht umgesetzt, da dies aufgrund der nachfolgenden Ausdauer- und Maximalkraftuntersuchung nicht praktikabel erschien. Ein demnach möglicher Messfehler von $< 3\%$ (Kyle et al., 2004b) wurde akzeptiert und ist als limitierender Faktor zu berücksichtigen. Der gemessene Wasseranteil blieb bei unseren Untersuchungen konstant (siehe 4.1). Von größeren Fehlern durch variierende Körperwasseranteile bei den Probanden ist dementsprechend nicht auszugehen. Um eine Inter-Instrumenten-Variabilität auszuschließen (Sergi et al., 2017), wurde während der Untersuchungen am ersten und zweiten MZP dasselbe Gerät der Firma Tanita verwendet.

Belastungsuntersuchungen am Radergometer

Die Ergometrie zur Bestimmung der Ausdauerleistung bietet sich als Belastungsuntersuchung an, da sie problemlos reproduzierbar und unkompliziert durchzuführen ist sowie weil durch sie wesentliche ausdauerleistungsbestimmende Funktionssysteme (insb. das kardiovaskuläre System) beurteilt werden können (Bringmann et al., 1990). Es existieren verschiedene Arten der Ergometrie, wie Fahrradergometer, Laufbandergometer und andere sportartspezifische Ergometer-Formen. Für eine orientierende Untersuchung der Ausdauerleistungsfähigkeit ist der Einsatz des Fahrradergometers sinnvoll. Die Ergometrie auf dem Fahrrad hat die Vorteile, dass

einerseits die Belastung unabhängig vom Körpergewicht ist, da dieses dem Sattel aufliegt und die Belastung durch die am Ergometer gewählte Watt-Einstellung vorgegeben ist, und andererseits keine Lernphase zur Ausführung der Bewegung nötig ist. Nachteilig bei der Radergometrie ist die Möglichkeit der frühzeitigen isolierten muskulären Erschöpfung des Musculus quadriceps femoris vor der Erschöpfung der zu untersuchenden Ausdauerkapazität (Löllgen, 2010). Daher ist bei der Erarbeitung des ergometrischen Belastungsschemas die Vermeidung unnötig langer Belastungen, wie in dieser Arbeit mit 2 min Belastungsdauer je Belastungsstufe geschehen, zu berücksichtigen (siehe 3.5). Ein von Kindermann et al. (2007) angebrachter Kritikpunkt ist, dass die Leistungsdiagnostik auf dem Radergometer lediglich bei Radsportlern und Triathleten ein adäquates Messinstrument zur Bestimmung der maximalen Ausdauerleistungsfähigkeit darstelle. Bei anderen Sportarten sei die Fahrradergometrie aufgrund des nicht sportartspezifischen Bewegungsmusters lediglich als orientierend einzustufen. In der vorliegenden Arbeit stand jedoch nicht die genaue Messung der maximalen sportartspezifischen Leistungsfähigkeit im Fokus der Untersuchung, sondern die Abbildung einer Leistungsentwicklung. Dazu eignet sich die Fahrradergometrie aufgrund ihrer hohen Reproduzierbarkeit (Korrelationskoeffizient $> 0,8$) ideal (Hofmann et al., 2017).

Um die Qualität und Aussagefähigkeit der gewonnenen Messwerte zu erhöhen sowie zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit, sind standardisierte Testbedingungen notwendig. Es muss bei der Erfassung der gemessenen physikalischen Leistung am Ergometer auch berücksichtigt werden, dass, je nach Wirkungsgrad, eine unterschiedliche biologische Leistung für die gleiche physikalische Leistung erbracht werden muss. Folglich muss bei Belastungsuntersuchungen darauf geachtet werden, dass der Wirkungsgrad zwischen den Untersuchungen unverändert bleibt.

Der Wirkungsgrad ist von verschiedenen Faktoren abhängig (Schardt, 2005):

- 1.) Drehzahl, Kurbelhöhe und Kurbellänge**
- 2.) Sattelhöhe und Fußposition**
- 3.) Tagesform und zirkadiane Einflüsse**
- 4.) Trainingszustand**
- 5.) Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck**

Der ökonomisch höchste Wirkungsgrad wird am Radergometer bei 50 Umdrehungen (U)/min erreicht. Um jedoch zielgerichtet eine Ausbelastung zu erreichen, sollte die Drehzahl bei ca. 90 U/min liegen (Löllgen et al., 2010a). Aus diesem Grund wurde den Probanden zur Standardisierung im Belastungsprotokoll eine Kadenz von 90 U/min vorgegeben. Auch die Höhe des Sattels hat einen signifikanten Einfluss auf die Übersetzung der biologischen Leistung in

physikalische Leistung, wie Müller (1938) zeigen konnte. Die Sattelhöhe wurde daher bei jedem Teilnehmer individuell eingestellt. Als Maßstab für die korrekte Sattelposition wurde festgelegt, dass bei dem jeweils untenstehenden Pedal der Mittelfuß zentral aufgesetzt und das Bein um einen Winkel von 5 bis 10° im Kniegelenk angewinkelt ist. Diese Sattelhöhe wurde vom Studienpersonal vermerkt und bei der Messung zum zweiten MZP wieder für den jeweiligen Probanden verwendet. Zusätzlich spielen die Tagesform und die Testvorbedingungen eine wesentliche Rolle bei der Untersuchung der Leistung auf dem Ergometer. Aus diesem Grund wurden die Probanden angewiesen, am Untersuchungstag sowie am Vortag größere oder ungewohnte berufliche und sportliche Belastungen unbedingt zu vermeiden (Schardt, 2005). Auch wurden sie instruiert, Alkohol- und Nikotinkonsum sowie Einnahme von Stimulanzien (Koffein, grüner Tee, Koffeinextrakte etc.) vor der Untersuchung zu unterlassen und auf einen ausreichenden Schlaf zu achten (Bringmann et al., 1990). Am zur Erfassung der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit verwendeten PWC₁₇₀-Protokoll wird von Heblisch et al. (2018) kritisiert, dass die Leistung bei diesem oftmals überschätzt werde. Das primäre Ziel der Untersuchung der Ausdauerleistungsfähigkeit war jedoch nicht die präzise Messung der genauen Leistungsfähigkeit, sondern die Evaluierung der Leistungsentwicklung unter Einfluss der Variablen AS- und Placebo-Verabreichung mit möglichst hoher Retest-Reliabilität. Durch die vorgenommene Standardisierung der oben erläuterten Einflussfaktoren auf die Leistung beim Ergometertest wurde versucht, eine möglichst hohe Retest-Reliabilität zu verwirklichen. Der Einfluss der von Schardt (2005) angeführten zirkadianen Rhythmik auf die Leistungsmessung konnte hingegen nicht vollständig ausgeschlossen werden. So war es bei einigen Probanden aus persönlichen und beruflichen Gründen nicht möglich, die Erfassung der Leistungsdaten zur exakt gleichen Tageszeit durchzuführen. Limitierend kam es daher in Einzelfällen zu einer Verschiebung von bis zu 3 h bei der Untersuchungszeit zwischen ersten und zweiten MZP. Zusätzlich variierte der Abstand zwischen der letzten Trainingseinheit und dem zweiten MZP aufgrund oben genannter Gründe um bis zu 1 d zwischen den Probanden. Folglich standen ihnen unterschiedliche Erholungszeiträume zur Verfügung, was die Leistung beim zweiten MZP beeinflusst haben könnte.

Herzfrequenzmessung

Die Herzfrequenz wurde während der Belastungsuntersuchung auf dem Ergometer mittels Herzfrequenzempfänger Polar ‚RS800CX‘ gemessen (Abb. 17). Es konnte bereits mehrfach gezeigt werden, dass die Registrierung der Herzaktivität mittels Herzfrequenzsensoren der Erfassung mittels Elektrokardiogramm (Referenzmethode) hinsichtlich der Genauigkeit annähernd gleichzusetzen ist (Korrelationskoeffizient $r = 0,99$) (Hollmann et al., 2006). Herstellerseitig wird eine ähnliche Genauigkeit von $\pm 1\%$ oder ± 1 bpm bei einem Frequenz-Erfassungsbereich von 15 bis 240 bpm angegeben (Polar Electro Oy, 2018). Aufgrund der

unkomplizierten Handhabung und der erläuterten hohen Genauigkeit wurde der Polar ‚RS800CX‘ in der Arbeit eingesetzt.

Messung von Maximalkraft mittels 1-RM

Die Ermittlung der Maximalkraft wurde mittels 1-RM an den Trainingsgeräten Bankdrücken, Latzug und Beinpresse durchgeführt. Alternativen dazu wären die isometrische (statische) Kraftmessung an der Kraftmessplatte und die isokinetische Kraftmessung. Beide Verfahren sind computergestützt, kostenintensiv und in der Durchführung wesentlich aufwendiger (Levinger et al., 2009). Die Messung der Maximalkraft an freien Gewichten wurde eingesetzt, da die 1-RM trotz der relativ unkomplizierten Durchführung bei korrekter Ausführung eine hohe Retest-Reliabilität aufweist und sich ideal für die Messung trainingsinduzierter Kraftveränderungen eignet (Faigenbaum et al., 2012). Zur Gewährleistung einer hohen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse müssen Rahmenbedingungen bei der Durchführung der Übungen eingehalten werden. Insbesondere die korrekte Positionierung des Probanden im jeweiligen Gerät hat einen signifikanten Einfluss auf die Reproduzierbarkeit. Diese beinhaltet Faktoren wie Griffposition, Griffstil, Fußstellung und Körperhaltung (Kraemer et al., 2006). Auch der Bewegungsumfang bei den getesteten Übungen hat einen signifikanten Einfluss auf die gemessene Maximalkraft (McMaster et al., 2014). Um den Einfluss dieser genannten Faktoren möglichst zu minimieren, wurden Bewegungsumfang, Griffposition, Griffstil, Körperhaltung und Fußstellung im Untersuchungsprotokoll eindeutig festgelegt (siehe 3.6). Die Durchführung von Maximalkraftuntersuchungen ohne vorherige muskuläre Erwärmung führt nachweislich zu verminderter Kraftentwicklung (McMaster et al., 2014). Um dieser potenziellen Limitation vorzubeugen, wurde für die 1-RM-Versuche ein strukturiertes Erwärmungsprotokoll entworfen (Abb. 19 in Kapitel 3.6).

Messung von Kraftausdauer bei 60 %/1-RM

Zur Messung der Kraftausdauer wurde den Probanden, wie in Kapitel 3.6 beschrieben, ein akustischer Rhythmus zur Bewegungssteuerung vorgegeben. Die Vollständigkeit eines vorher definierten Bewegungsablaufes (siehe 3.6) wurde vom Studienpersonal überwacht. Bei Unfähigkeit der Teilnehmer aufgrund von muskulärer Ermüdung einen korrekten Bewegungsablauf bei der Untersuchung der Kraftausdauer aufrecht zu erhalten, wurde die Erfassung der maximal möglichen Wiederholungen beendet. Die korrekte Bewegungskörperhaltung und die Ermüdung im Testverlauf wurden durch das Studienpersonal bewertet. Die Einschätzung erfolgte demnach subjektiv und konnte daher zwischen den Untersuchern variieren. Dies führt zu einer verminderten Interrater-Reliabilität. Um diese Problematik möglichst zu minimieren, wurde angestrebt, eine Messstation jeweils von derselben Person des Studienpersonals bei MZP 1 und MZP 2 zu betreuen. Es verbleibt jedoch limitierend auch bei einem Untersucher eine Subjektivität

bei der Bewertung der Bewegungsausführung, was die Anzahl der durchgeführten Wiederholungen trotz vorgegebenem akustischem Rhythmus in geringem Maße beeinflusst.

5.2 Ergebnisdiskussion und Limitationen

Der in der Einleitung dargestellte aktuelle Forschungsstand auf dem Gebiet der Nahrungssupplementierung mittels EAA- und Proteinpräparaten zeigt auf, dass zwischen den Erkenntnissen auf molekular-zellulärer und denen von Arbeiten auf makroskopisch-funktioneller Ebene häufig eine Diskrepanz besteht. Als gesichert gilt, dass der Anstieg des Plasmaspiegels von EAA den effektivsten und potentesten Einflussfaktor auf die Proteinbiosynthese der quergestreiften Skelettmuskulatur darstellt (Bohé et al., 2003). Ohne die externe Zufuhr von EAA ist eine anabole Netto-Stoffwechselsituation in der Skelettmuskulatur nach Trainingsreizen nicht möglich (Biolo et al., 1995; Børsheim et al., 2002; Phillips et al., 1997). Dementsprechend liegt die Vermutung nahe, dass durch die Erhöhung der Verfügbarkeit von EAA im Plasma die Synthese von für die Hypertrophie und die Kraftentwicklung der quergestreiften Muskulatur bedeutenden myofibrillären und sarkoplasmatischen Proteinfractionen gesteigert wird, wobei es demzufolge auf makroskopisch-funktioneller Ebene nachweislich zu einer Zunahme der maximal möglichen muskulären Kraftentwicklung und der muskulären Masse kommt. Dennoch divergieren die Ergebnisse von Untersuchungen hinsichtlich der Effektivität einer zusätzlichen Zufuhr von EAA- und Proteinpräparaten auf Parameter der Maximalkraft und auf Parameter der Körperzusammensetzung häufig von den eindeutigen Erkenntnissen im Proteinmetabolismus der Skelettmuskulatur. Einerseits ist die plasmatische Verfügbarkeit von AS höchstwahrscheinlich der bedeutsamste Faktor bei dem Versuch, die maximale Muskelkraft zu erhöhen und die muskuläre Masse zu fördern. Andererseits sind nachweislich auch andere Aspekte, wie die bereits bestehende tägliche Energieaufnahme und die vorbestehende tägliche Aufnahme an Proteinen bzw. AS, die eingesetzten Trainingsprotokolle sowie die Trainingserfahrung und -dauer der Individuen maßgeblich an diesem Prozess beteiligt. So ist es denkbar, dass der Nachweis signifikanter Effekte durch Erhöhung der AS- bzw. Proteinzufuhr auf die Maximalkraft und Körperzusammensetzung in einigen Studien aufgrund dieser Kovariablen misslang.

Eine andere Situation ergibt sich bei der Untersuchung des Einflusses der zusätzlichen Aufnahme von Proteinen bzw. AS auf die Ausdauerleistungsfähigkeit. Während der Forschungsfokus in der Trainings- und Ernährungswissenschaft zunächst vor allem auf die Fragestellung des Einflusses von Protein- und AS-Supplementierung auf Parameter der Maximalkraft und des Körperaufbaus gerichtet war, steigerte sich in den letzten Jahren das wissenschaftliche Interesse am Einfluss von Protein- und AS-Verfügbarkeit auf die Leistungsfähigkeit bei ausdauertypischen Belastungen. Auf molekularer Ebene konnte aufgezeigt werden, dass auch die mitochondriale Proteinfraction und damit vermutlich gleichzeitig die Enzyme der oxidativen Phosphorylierung von der Proteinsynthesesteigerung durch vermehrte AS-Verfügbarkeit betroffen sind (Bohé et al., 2001).

Die wenigen bisherigen Forschungsergebnisse weisen jedoch nicht auf einen Vorteil der vermehrten Bereitstellung von AS auf die Ausdauerleistungsfähigkeit hin (siehe 1.6).

In der folgenden Diskussion werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit beurteilt und in den Kontext des aktuellen Forschungsstandes gesetzt. Gleichzeitig werden anhand dessen die Möglichkeiten und Grenzen einer Supplementierung mittels EAA auf Parameter der Maximalkraft, Kraftausdauer und Ausdauer sowie auf die Körperzusammensetzung erörtert.

Auswirkungen der Supplementierung von EAA auf den Parameter Maximalkraft

In einem bedeutenden Anteil der Studien mit dem Ziel, den Einfluss einer erhöhten Zufuhr von Proteinen und AS auf die Maximalkraft zu untersuchen, konnten keine signifikanten positiven Interaktionseffekte nachgewiesen werden, insbesondere in solchen mit kurzen Interventionszeiträumen und kleinen Probandengruppen (siehe 1.6). Auffällig ist hingegen, dass in Arbeiten ohne signifikante Effekte dennoch meist größere, aber statistisch nicht signifikante Maximalkraftzunahmen in den Interventionsgruppen aufgezeigt werden konnten (Jäger et al., 2017). Demgegenüber sind es meist Metaanalysen sowie Studien mit großen Probandenkollektiven und Interventionszeiträumen von mehr als 8 Wochen, in deren Rahmen statistisch eindeutig positive Ergebnisse belegt werden konnten (siehe 1.6).

In der vorliegenden Arbeit konnte lediglich ein signifikanter Effekt auf die Maximalkraft in der Übung Beinpresse nachgewiesen werden. In den anderen beiden getesteten Übungen Latzug und Bankdrücken ließ sich kein signifikanter Unterschied zwischen Kontroll- und Interventionsgruppe feststellen. Es wurde jedoch sowohl in der Übung Latzug (11,9 % Zunahme in Interventionsgruppe vs. 6,4 % Zunahme in Kontrollgruppe) als auch in der Übung Bankdrücken (8,2 % Zuwachs in Interventionsgruppe vs. 5,4 % Zunahme in Kontrollgruppe) eine positive Tendenz in der Interventionsgruppe beobachtet. Zunächst sollte berücksichtigt werden, dass das Studiendesign und der Trainingsplan nicht primär zur Entwicklung der Maximalkraft, sondern der Kraftausdauer und Ausdauer konzipiert waren. Die Erhebung der Maximalkraft stellte in diesem Zusammenhang einen notwendigen Bezugspunkt zur Messung der Kraftausdauer dar (siehe Definitionen in Kapitel 3.6). Es erscheint auf Basis des aktuellen Forschungsstandes demnach möglich, dass bei primärer Ausrichtung des Studiendesigns auf die Entwicklung der Maximalkraft ein signifikant positiver Effekt in allen drei getesteten Übungen hätte nachgewiesen werden können, ähnlich wie in einer Arbeit von Hottenrott und Neumann (2006). Diese konnten in zehn von zwölf getesteten Übungen nach einem sechswöchigen Krafttraining signifikant positive Auswirkungen der Verabreichung von EAA auf das Kraftpotenzial aufzeigen.

Eine weitere mögliche Erklärung für den ausbleibenden signifikanten Interventionseffekt in den Übungen Latzug und Bankdrücken ist die gewählte Kollektivgröße. Eine der umfangreichsten Arbeiten zu diesem Thema ist eine Metastudie von Cermak et al. (2012) mit einer zusammenfassenden Datenanalyse aus 22 randomisiert-kontrollierten Untersuchungen mit insgesamt 680 eingeschlossenen Probanden. Hier konnte ein signifikanter Interventionseffekt der Proteinsupplementierung von im Mittel 13,5 kg auf die Maximalkraft bei der Übung Beinpresse nachgewiesen werden (95 %-KI: 6,4–20,7 kg; $p < 0,005$). In Arbeiten mit kleineren Probandenkollektiven hingegen werden häufig keine bzw. nur vereinzelte eindeutig positive Effekte nachgewiesen (u. a. Erskine et al., 2012; Hoffman et al., 2007; Weisgarber et al., 2012). Die Untersuchungen von Hoffman et al. (2007) liefern diesbezüglich aufschlussreiche Ergebnisse, die den Resultaten der vorliegenden Arbeit ähneln. Es wurde eine mit 21 männlichen Probanden relativ kleine Stichprobe mit ähnlichen Ein- und Ausschlusskriterien wie bei dieser Arbeit gewählt. Das Kollektiv wurde hinsichtlich des Effektes einer Supplementierung mittels Molkenprotein auf die Maximalkraft der Übungen Bankdrücken und Kniebeuge in einem randomisierten und kontrollierten Studienprotokoll untersucht. Es ist auffallend, dass die Maximalkraft der unteren Extremität, wie bei dem Studienprotokoll der vorliegenden Arbeit, signifikant gesteigert wurde, wohingegen bei der Maximalkraft der oberen Extremität, getestet durch die Übung Bankdrücken, keine signifikante Steigerung gegenüber der Kontrollgruppe belegt werden konnte. Durch den beispielhaften Vergleich der Arbeiten von Cermak et al. (2012) und Hoffman et al. (2007) lässt sich die Vermutung äußern, dass die in den Übungen Latzug und Bankdrücken gemessene positive Tendenz bei einer weiteren Vergrößerung des Probandenkollektivs ein signifikantes Niveau erreicht hätte. Auch erscheint es in diesem Zusammenhang möglich, dass die untere Extremität aufgrund ihrer größeren Gesamtmuskelmasse sensibler auf eine zusätzliche Aufnahme von AS/Proteinen reagiert, da ebenso Hoffman et al. (2007) signifikante Effekte nur in der Übung Beinpresse nachweisen konnten. So könnten signifikante Veränderungen des maximalen Kraftpotenzials in dieser Muskelgruppe früher belegt werden als in der oberen Extremität.

Auch die Dauer der Trainingsintervention und die vorbestehende Erfahrung im Gewichtstraining spielen eine nachgewiesene Rolle, wenn der Einfluss von zusätzlicher Protein- und AS-Zufuhr auf die Entwicklung des maximalen Kraftpotenzials durch Krafttraining untersucht werden soll (siehe 1.6). Pasiakos et al. (2015) führen in ihrer Übersichtsarbeit aus, dass bei Untersuchungsprotokollen mit untrainierten oder im Training wenig erfahrenen Probanden, die weniger als 8 Wochen andauern, häufig keine signifikanten Effekte auf die Maximalkraft nachgewiesen werden können, da in den ersten Wochen eines neu begonnenen Krafttrainings neuronale Adaptions- und motorische Lernprozesse überwiegen. Unter diesen neurologisch-motorischen Anpassungsvorgängen werden Lernprozesse in Bewegungsabläufen durch Verbesserung der intra- sowie intermuskulären Koordination zwischen Agonisten, Antagonisten

und Synergisten verstanden. Es ist davon auszugehen, dass die Zunahmen im Kraftpotenzial vor allem in den ersten beiden Wochen fast ausschließlich auf neuronale Anpassungen zurückzuführen sind und auch im weiteren Verlauf der ersten Trainingswochen einen beträchtlichen Anteil an den Zugewinnen in der Maximalkraft haben (Folland und Williams, 2007). Diese neuronalen Adaptionen entziehen sich vermutlich einer diätetischen Intervention. Um den Einfluss dieser Problemstellung in zukünftigen Arbeiten und Untersuchungen zu reduzieren, empfiehlt sich eine Verlängerung des Untersuchungszeitraumes. Pasiakos et al. (2015) raten zu einer Ausdehnung des Zeitraumes auf mindestens 8 Wochen bei im Krafttraining unerfahrenen Probanden. Alternativ sollten Individuen untersucht werden, welche bereits umfassende Erfahrung im Krafttraining besitzen, wie es im ursprünglichen Studiendesign mit der Untersuchung von Leistungssportlern geplant war. So konnte nachgewiesen werden, dass besonders Probanden mit Trainingserfahrung sensitiv auf eine Supplementierung reagieren (Cermak et al., 2012), was sich am ehesten durch die bereits durchlaufenen neuronalen Lernprozesse erklären lässt. Eine andere sinnvolle und in der Praxis unkompliziert umzusetzende Möglichkeit für zukünftige Untersuchungen wäre die Durchführung einer Eingewöhnungsphase bei Probanden mit geringer oder fehlender Trainingserfahrung im Vorfeld der eigentlichen Interventionsphase. Während dieser Lernphase trainieren alle Teilnehmer im Rahmen des konzipierten Trainingsplanes für einige Wochen, sodass die neuronalen Anpassungsprozesse an die Trainings- und Testübungen bereits durchlaufen werden. Erst nach Abschluss dieser Lernphase würde die Erfassung aller anthropometrischen und leistungsbezogenen Parameter für den ersten MZP erfolgen. So wäre zu erwarten, dass neuronal bedingte Lernprozesse und Anpassungen während der Intervention an Bedeutung verlieren und Leistungsentwicklungen, die durch effektive muskuläre Kraftentwicklung und Hypertrophie hervorgerufen werden, differenzierter untersucht werden können.

Um in Zeiträumen von intensiven und lang andauernden körperlichen Trainingsphasen einen Zugewinn an FFM zu erreichen und die Trainingseffekte auf die körperliche Leistungsfähigkeit zu maximieren, ist eine ausreichende Energieaufnahme notwendig. Bei inadäquater Zufuhr von Energie, die den durch die Belastung erhöhten Bedarf des Metabolismus nicht erfüllt, werden die Hypertrophie der Skelettmuskulatur und die Leistungsentwicklung wesentlich beeinträchtigt (Rodriguez et al., 2009). Die tägliche Kalorienaufnahme, die Einfluss auf die gemessene Maximalkraft, aber auch auf die Körperzusammensetzung sowie die Kraftausdauer- und Ausdauerleistung hat, wurde in dem Studienprotokoll der vorliegenden Arbeit nicht erfasst. Demnach kann nicht sicher beurteilt werden, ob eventuell zwischen den beiden Gruppen ein kalorisches Ungleichgewicht vorlag, das die Leistungsentwicklung hätte beeinträchtigen können. Die zuverlässigste Methode, den Einfluss dieser Variable zu eliminieren, ist der Einsatz eines fest vorgegebenen Ernährungsplanes mit individueller Festlegung der täglichen Energieaufnahme anhand des Körpergewichtes und des Gesamtenergieumsatzes. Die Ernährung nach einem festen

Protokoll auszurichten, würde den Probanden eine hohe Bereitswilligkeit und einen hohen Organisationsaufwand abverlangen. Die Überlegung vor Studienbeginn war, dass eine derart umfangreiche Maßnahme die Compliance der Studienteilnehmer senken würde. Zusätzlich hätte diese Maßnahme die organisatorischen und finanziellen Ressourcen überschritten. Um dennoch den Einfluss der Kovariable Energieaufnahme zu minimieren, wurden die Probanden im Studienprotokoll angewiesen, Veränderungen in ihrer täglichen Ernährung strikt zu vermeiden und die tägliche Kost in gewohnter Menge und Zusammensetzung fortzuführen. Dies senkt die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilnehmer durch eine reaktive Erhöhung oder Senkung ihrer täglichen Energieaufnahme während der Untersuchungsperiode zusätzlichen Einfluss auf die zu untersuchenden Leistungsparameter genommen haben. Eine generell negative Energiebilanz bei Studienteilnehmern kann durch diese Maßnahme hingegen nicht ausgeschlossen werden. Die Entwicklung des Körperfettanteils zeigte in beiden Gruppen einen gegenläufigen Trend. In der Interventionsgruppe ließ sich eine geringe Reduktion des Körperfettanteils von im Mittel 14,6 % auf im Mittel 14,1 % beobachten. Demgegenüber steht eine geringfügige Zunahme in der Kontrollgruppe von im Mittel 17,3 % auf 17,5 %. Aufgrund der Zunahme der FFM und des Körperfettanteils lässt sich sowohl eine ausreichende Nährstoffversorgung als auch eine anabole metabolische Situation in der Kontrollgruppe vermuten. Die geringfügige Reduktion des Körperfettanteils und die tendenziell geringere Steigerung der FFM könnten auf eine suboptimale Energieverfügbarkeit und Nährstoffversorgung in der Interventionsgruppe hinweisen. So ist es möglich, dass trotz Randomisierung eine unterschiedliche Energiebilanz zwischen den Gruppen vorlag, die die Akkumulation von FFM und Leistungssteigerungen in der Interventionsgruppe beeinträchtigt hat. Die Zunahme der FFM in der Interventionsgruppe spricht jedoch zumindest gegen eine ausgeprägte kalorische Defizitsituation. Eine Randomisierung der Probanden verringert die Wahrscheinlichkeit von kalorischen Disparitäten zwischen den Gruppen; ein sicherer Ausschluss von negativen Energiebilanzen und kalorischen Ungleichheiten ist hingegen nur mit vorgegebenen Ernährungsprotokollen möglich. In zukünftigen Arbeiten sollte die Kovariable Energiebilanz daher möglichst durch eine festgelegte Ernährung kontrolliert werden, um optimale anabole Bedingungen zu gewährleisten und eine ausreichende Energieversorgung in beiden Gruppen sicherzustellen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stützen teilweise die Beobachtung anderer Studien, dass eine Supplementierung mittels EAA- oder Proteinpräparaten die muskuläre Anpassungsreaktion auf Krafttrainingsreize mit dem Ziel der Maximalkraftentwicklung unterstützen kann. Es lässt sich nach Begutachtung der bisherigen Forschung auf diesem Gebiet auch vermuten, dass bei Verlängerung des Interventionszeitraums und bei Vergrößerung des Probandenkollektivs statistisch signifikante Interaktionseffekte auch in den Übungen Latzug und Bankdrücken hätten abgebildet werden können. Die Beobachtung einer tendenziell höheren Maximalkraftentwicklung in der Interventionsgruppe in den beiden genannten Übungen im Rahmen dieser Arbeit passt zu

den Arbeiten, in denen kein statistisch eindeutiger Interaktionseffekt nachgewiesen werden konnte, jedoch verhältnismäßig größere Entwicklungen in den untersuchten Übungen aufgezeigt werden konnten (Jäger et al., 2017). Eine generelle Empfehlung zur zusätzlichen Aufnahme von EAA- oder Proteinpräparaten mit dem Ziel der Optimierung von Maximalkraftzuwächsen durch körperliches Training kann jedoch nicht ausgesprochen werden. Bei Athleten, bei denen Zugewinne in der Maximalkraft das primäre Ziel (bspw. Gewichtheber) oder für die eigentliche Sportart hilfreich sind (bspw. Boxer, Rugby-Spieler) und die bereits über eine umfassende Erfahrung im Krafttraining verfügen, kann die Supplementierung mit Präparaten aus EAA oder ganzen Proteinen als sinnvolle Ergänzung zur gewohnten Mischkost für die Maximalkraftsteigerung empfohlen werden. Auch Sportlern, die über ihre tägliche Mischkost keine ausreichende Protein- und AS-Aufnahme erreichen und sich im Zustand negativer Stickstoffbilanz befinden, kann zu einer Supplementierung geraten werden, um eine anabole Stoffwechsellage zu induzieren und die Stickstoffbilanz zu optimieren. Anfänger im Bereich des Krafttrainings haben aufgrund von initial beim Training erfolgenden neuronalen Lernprozessen vor den eigentlichen gewollten muskulären Anpassungsreaktionen vermutlich nur wenig bis keinen zu erwartenden Nutzen von einer Supplementierung durch EAA oder Proteine. Diese sollten daher erst bei zunehmender Intensivierung und Dauer des Trainingsprogrammes eine zusätzliche Aufnahme erwägen. Grundsätzlich sind vorgefertigte Präparate aus EAA oder Proteinpräparate eine mit geringem Zeitaufwand verbundene Möglichkeit zur Erhöhung der täglichen Aufnahme. Dennoch steht auch die Erhöhung der Protein- und AS-Aufnahme über die Mischkost den vorgefertigten Präparaten in der Effektivität vermutlich nicht nach (Rodriguez et al., 2009).

Auswirkungen der Supplementierung von EAA auf die Parameter der Körperzusammensetzung

Bei der Untersuchung der Körperzusammensetzung wurden die Parameter FFM [kg], Fettanteil [%], Wasseranteil [%] und Körpergewicht [kg] untersucht. Beim Körperwasseranteil konnte keine signifikante Veränderung über die Zeit oder zwischen den Gruppen festgestellt werden. Dies war auch nicht zu erwarten, da ausgeprägte Veränderungen des Körperwasseranteils nur in pathologischen Zuständen, wie Dehydratisierung (bspw. Exsikkose) oder Hyperhydratisierung (bspw. renale oder kardiale Insuffizienz), auftreten und Probanden mit diesen Erkrankungsbildern durch die Ein- und Ausschlusskriterien bereits von der Teilnahme an der Studie ausgenommen waren.

Ein kraftausdauer- und ausdauerorientiertes Training kann zur Akkumulation von FFM führen; dennoch sind Zugewinne in größerer Menge nicht typisch für repetitive Ausdauerbelastungen. Diese sind bei klassischem Training mit Fokus auf Hypertrophie- und Maximalkraftentwicklung

nachzuweisen (Ferguson-Stegall et al., 2011). Die Trainingsintervention im Rahmen der vorliegenden Studie führte in beiden Gruppen zu einer signifikanten, aber nur geringen Zunahme der FFM über die Zeit. Dies war bei einer Wichtung des Trainings auf die Entwicklung von Kraftausdauer und Ausdauer zu erwarten. Die Interventionsgruppe zeigte keinen signifikanten Interventionseffekt gegenüber der Kontrollgruppe. Im Gegenteil ließen sich tendenziell geringere Zuwächse an FFM in der Interventionsgruppe messen (im Mittel 0,7 kg in der Interventionsgruppe vs. 1,2 kg in der Kontrollgruppe). Die Zunahme der FFM in beiden Gruppen bestätigt einerseits, dass der Trainingsaufbau per se effektiv gestaltet war. Andererseits bietet die Supplementierung mit EAA auf Basis der hier vorliegenden Daten vermutlich keinen Vorteil bei der Akkumulation von FFM im Rahmen eines sechswöchigen Kraftausdauer- und Ausdauertrainings.

Basierend auf dem bisherigen Forschungsstand bezüglich der Wirkung von zusätzlicher Aufnahme von AS/Proteinen in Kombination mit Trainingsreizen ist jedoch davon auszugehen, dass unter bestimmten Bedingungen durch die Supplementierung ein Zugewinn an FFM gefördert werden kann (siehe Kapitel 1.6). Die ISSN hält in ihrem Positionspapier fest, dass der bei einem Training auftretende Zugewinn an FFM durch die Gabe von zusätzlichen Proteinen und demzufolge auch vermutlich AS gefördert werden kann, weist jedoch explizit auf die Kombination mit einer positiven Energiebilanz und vor allem mit einem Krafttraining mit Trainingsintensität im Hypertrophie- und Maximalkraftbereich hin (Jäger et al., 2017). Die tägliche Energieaufnahme der Probanden wurde nicht überwacht. Über die Energiebilanz einzelner Teilnehmer kann also keine Aussage getätigt werden. Die Zugewinne an FFM in beiden Gruppen sprechen gegen ausgeprägte Energiedefizite im gesamten Probandenkollektiv. Die divergierende Entwicklung der Körperfettanteile in beiden Gruppen lässt jedoch über eine suboptimale Energieverfügbarkeit in der Interventionsgruppe spekulieren. So erscheint es möglich, dass ein signifikanter Interaktionseffekt auf die FFM aufgrund unzureichender Energieversorgung in der Interventionsgruppe ausblieb.

Entscheidend ist aber mutmaßlich der durchgeführte Trainingsmodus. Der primäre Fokus der vorliegenden Arbeit lag auf dem Training und der Untersuchung der Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsfähigkeit. Dies entspricht damit nicht einem klassischen Krafttraining mit Fokus auf Muskelhypertrophie und Maximalkraftentwicklung, wie von der ISSN angeführt. Die Arbeiten, die von der ISSN sowie von Pasiakos et al. (2015) und Cermak et al. (2012) als Beleg für eine positive Wirkung von zusätzlicher Protein- und AS-Zufuhr auf die Körperzusammensetzung angeführt werden, basieren auf Maximalkraft- und Hypertrophie-training. Die einzige bekannte Arbeit, in der, wie in der vorliegenden Arbeit, der Einfluss von Kraftausdauer- oder Ausdauertraining in Kombination mit erhöhter Protein- oder AS-Zufuhr auf die Körperzusammensetzung untersucht wurde, wurde durch Roberson et al. (2018) durchgeführt.

In ihren Untersuchungen zeigte sich nach 10 Wochen ausdauerorientiertem Lauftraining bei 17 Probanden ein Verlust von im Mittel 100 g FFM in der mit 50 g Molkenprotein täglich supplementierten Gruppe, während die Placebo-Gruppe im Mittel 700 g an FFM zunahm ($p = 0,049$). Es konnte in der vorliegenden Arbeit ein signifikanter Zuwachs der FFM in beiden Gruppen evaluiert werden. Die von Roberson et al. (2018) untersuchten Personen, die eine Supplementierung mittels Molkenprotein erhielten, verloren über den Interventionszeitraum FFM, obwohl sie durchschnittlich 400 kcal/d mehr Energie über die Nahrung zu sich nahmen. Im Rahmen der vorliegenden Studie verloren die Probanden in der Interventionsgruppe keine FFM, der Anstieg war jedoch im Mittel um 0,5 kg geringer. Es erscheint nach diesen Ergebnissen somit auch möglich, dass die geringere Zunahme der FFM in der Interventionsgruppe nicht durch eine suboptimale Energieversorgung, wie es bei den Auswirkungen von EAA auf die Maximalkraft bereits diskutiert wurde, bedingt war.

Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Datenlage hinsichtlich des Einflusses einer zusätzlichen Aufnahme von EAA und Proteinen auf die Körperzusammensetzung bei Ausdauer- und Kraftausdauerathleten begrenzt. Auf Basis der hier vorliegenden Daten sowie der Daten von Roberson et al. (2018) erscheint eine positive Beeinflussung der Körperzusammensetzung im Sinne einer Akkumulation von FFM durch AS- oder Proteinsupplementierung bei repetitiven Ausdauer- und Kraftausdauertrainingsbelastungen aktuell fraglich. Sollte ein positiver Einfluss vorliegen, so ist dieser aufgrund des geringen Effektes von Ausdauertraining auf die FFM lediglich moderat zu erwarten. Eine positive Wirkung der Supplementierung auf den Körperfettanteil ist aufgrund der beobachteten gegenläufigen Tendenz im Rahmen dieser Studie möglich. In zukünftigen Forschungsarbeiten sollten die Ergebnisse der vorliegenden Thesis und der Arbeit von Roberson et al. daher mit größeren Probandenkollektiven und längeren Interventionszeiträumen überprüft werden. Im Idealfall sollte auf Ernährungsprotokolle zurückgegriffen werden, um die Kovariablen der Energie- und Makronährstoffaufnahme beurteilen zu können. Auf Basis der hier dargelegten Ergebnisse kann zum aktuellen Zeitpunkt für Ausdauer- und Kraftausdauerathleten keine Empfehlung einer Supplementierung zusätzlich zur täglichen Mischkost gegeben werden. Es sollte auch berücksichtigt werden, dass in vielen Ausdauerdisziplinen, wie Triathlon und Etappenrennen beim Radfahren, ausgeprägte Zuwächse der FFM eher kontraproduktiv für die Belastungen sind. Dies ist durch den erhöhten Sauerstoffbedarf und die vermehrte Gelenkbelastung durch das zusätzliche Gewicht bedingt. Die Supplementierung von EAA könnte jedoch bei Ausdauerathleten, die sich regelmäßig hochintensiven Ausdauerbelastungen ($> 50\%$ der $\dot{V}O_{2max}$) aussetzen, dazu dienen, den erhöhten AS- und Proteinbedarf zu decken (Kreider et al., 1993) und den Erhalt an Muskelmasse sicherzustellen, wenn dies über die tägliche Ernährung nicht ausreichend gelingt.

Auswirkungen der Supplementierung von EAA auf die Parameter der Kraftausdauer und Ausdauerleistungsfähigkeit

Es gilt als gesichert, dass es nicht nur durch auf Maximalkraft und Muskelhypertrophie fokussierte Trainingsgestaltung, sondern auch durch über einen längeren Zeitraum stattfindende repetitive Ausdauer- und Kraftausdauertrainingseinheiten zu nachweislichen spezifischen metabolischen und strukturellen Adaptationen in der Skelettmuskulatur kommt. Diese beinhalten bei Langzeit- als auch bei Kurzeitdauerbelastungen einerseits die vermehrte Angiogeneese mit konsekutiver Ökonomisierung der ablaufenden Diffusionsvorgänge zwischen Muskulatur und Blut. Andererseits lässt sich eine Zunahme der Mitochondrienzahl und -dichte nachweisen und damit einhergehend eine Ausweitung der Fähigkeit der Zellen, aerobe Glykolyse zu betreiben. Weiterhin kommt es in den Skelettmuskelzellen zu einer vermehrten Einlagerung von Myoglobin (Grosser et al., 2004; Tarnopolsky, 2004). Für diese Prozesse sind, wie in Kapitel 1.1. erläutert, zwingend AS bzw. lediglich EAA (siehe 1.3) als molekulare Grundbausteine notwendig. Demzufolge erscheint die zusätzliche Zufuhr von AS respektive Proteinen grundsätzlich biologisch plausibel bei der Überlegung, die muskulären Adaptionsprozesse an Ausdauer- und Kraftausdauertraining zu unterstützen. Diese Grundüberlegung wird auch durch eine Arbeit von Bohé et al. (2001) gestützt, die nachweisen konnten, dass es durch Dauerinfusion von AS bei Probanden im Ruhezustand zu einer gesteigerten Syntheseaktivität aller Proteinfractionen der Skelettmuskulatur (myofibrilläre, sarkoplasmatische und insbesondere die mitochondriale Fraktion) kam. Dies lässt vermuten, dass die nach Ausdauer- und Kraftausdauertraining auftretende Erhöhung der Mitochondrienzahl und -dichte durch zusätzliche AS-Zufuhr additiv respektive synergistisch unterstützt werden könnte. In der vorliegenden Arbeit konnte jedoch kein Interventionseffekt durch die AS auf die Kraftausdauer- und die Ausdauerleistungsfähigkeit nachgewiesen werden. Auch ein positiver Trend konnte, anders als bei der untersuchten Maximalkraft, nicht evaluiert werden. Im Gegenteil zeigte sich bei Einnahme von AS in allen drei getesteten Übungen der Kraftausdauerleistungsfähigkeit eine prozentual geringere Steigerung der Anzahl an maximal möglichen Wiederholungen und eine geringere Leistungszunahme beim PWC-Test (W/kg KG) im Vergleich mit der Placebogruppe. Diese Ergebnisse sind mit dem eingangs erläuterten Forschungsstand auf diesem Gebiet vereinbar (siehe 1.6). Es bleibt jedoch aktuell ungeklärt, wie sich diese Erkenntnisse auf makroskopisch-funktioneller Ebene in den Kontext der eigentlich biologisch plausiblen Grundüberlegungen und der Erfahrungen auf molekularer Ebene einordnen lassen. Es stellt sich die Frage, wie es sich erklären lässt, dass die Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsentwicklung in der mit AS supplementierten Interventionsgruppe nicht signifikant unterschiedlich gegenüber der Kontrollgruppe ausfiel.

Wie auch bei der diskutierten Untersuchung der Maximalkraft kommen die bereits besprochenen Limitationen und Studiendesign-Faktoren, wie die Energieaufnahme der Probanden, der Interventionszeitraum und die Stichprobengröße, als Erklärungsansatz infrage. Diese können nicht vollständig ausgeschlossen werden, jedoch war das Trainingskonzept der vorliegenden Arbeit, anders als bei der Untersuchung der Maximalkraft, auf die Entwicklung der Ausdauer und Kraftausdauer hin konzipiert. Dementsprechend sollten eventuell vorliegende Interventionseffekte bei diesen Parametern problemloser nachzuweisen sein als Effekte bei der Maximalkraft. Dennoch wurde eine umgekehrte Tendenz bei der untersuchten Kraftausdauer und Ausdauer in den Untersuchungen beobachtet. Die Arbeiten weiterer Forschungsgruppen geben andere mögliche Erklärungsansätze als die Rückführung auf mögliche Limitationen im Studienprotokoll.

Bohé et al. (2001) konnten, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, nachweisen, dass die Proteinsynthese der mitochondrialen Proteinfraction in der Skelettmuskulatur im Ruhezustand durch die Zufuhr von AS positiv beeinflusst wird. Der Ruhezustand entspricht jedoch nicht der Situation, die für die aktuelle Fragestellung von Relevanz ist. Von Interesse ist die Situation der mitochondrialen Proteinsynthese nach Ausdauer- und Kraftausdauertrainingsreizen und die Frage, ob diese durch die Zufuhr von AS zusätzlich forciert werden kann. Eindeutig ist die mitochondriale Proteinsynthese nach Training mit ausdauertypischen Belastungen gesteigert (Tarnopolsky, 2004). Breen et al. (2011) hingegen konnten nachweisen, dass die myofibrilläre Proteinsynthese, jedoch nicht die mitochondriale nach einem 90-minütigen intensiven Fahrrad-Zeitfahren durch Proteinzusatz gegenüber einer Kontrollgruppe weiter stimuliert werden kann. Diese Erkenntnis lässt zumindest einen positiven Einfluss von erhöhter Plasmaverfügbarkeit von AS nach Ausdauerbelastungen auf den Ausbau der Mitochondriendichte und -anzahl zweifelhaft werden. Diese Vermutung wird auch von den Ergebnissen von Ferguson-Stegall et al. (2011) gestützt. Sie untersuchten, wie sich die regelmäßige Verabreichung von Schokoladenmilch (als Kohlenhydrate- und Proteinquelle) gegenüber der alleinigen Verabreichung von Kohlenhydraten und gegenüber der Nutzung eines Placebo-Präparats während eines 4,5-wöchigen Ausdauertrainings auf das Vorhandensein zweier Enzyme des Citratzyklus (Succinat-Dehydrogenase und Citratsynthase), als Marker der oxidativen Kapazität, auswirkt. Die Arbeitsgruppe konnte nachweisen, dass es durch das Ausdauertraining in allen drei Gruppen, wie zu erwarten, zu signifikanten Anstiegen der Enzymaktivität kam. Dennoch konnte ein signifikanter Interventionseffekt auf die Enzymaktivität durch die zusätzliche Aufnahme von Protein nicht beobachtet werden. Es ist als gesichert anzusehen, dass Ausdauer- und Kraftausdauertraining die mitochondriale Proteinsynthese effektiv stimulieren und damit die oxidative Kapazität der Muskulatur erhöhen, jedoch scheint die Aufnahme von Protein und AS in engem zeitlichen Zusammenhang diesen Syntheseprozess nicht weiter zu fördern.

Auch andere Vorgänge, wie die Angiogeneese und die Zunahme der Myoglobin-Moleküle in der Muskulatur als Teil des Anpassungsprozesses an ausdauertypische Reize, sind auf das Vorhandensein einer ausreichenden Anzahl an AS als molekulare Grundbausteine angewiesen. Es ist anhand der vorliegenden Ergebnisse jedoch fraglich, ob diese Prozesse durch eine vermehrte Verfügbarkeit von AS stimuliert werden können. Wenn Individuen sich nicht in einer Mangelernährungssituation befinden und eine ausgeglichene Stickstoffbilanz vorliegt, scheinen der körpereigene Pool (siehe 1.1) und die Aufnahme von AS über die tägliche Mischkost ausreichend, um den Bedarf für die muskulären Anpassungsprozesse an Ausdauerbelastungen zu decken. In seiner Übersichtsarbeit zum Thema Proteinbedarf bei Ausdauerathleten kommt Tarnopolsky (2004) zu dem Schluss, dass bei dieser Sportlergruppe ein erhöhter Proteinbedarf von circa 1,6 g/kg KG/d zur Erreichung einer ausgeglichenen Stickstoffbilanz vorliegt. Diese Werte bezieht er jedoch explizit auf professionelle Eliteathleten. Profisportler können durch ihre extreme Trainingsintensität und ihren folglich extremen Energiebedarf nicht mit Freizeit- oder Ausdauerathleten mit niedriger bis moderater Trainingsintensität, wie die Probanden dieser Arbeit, gleichgesetzt werden. So weist er auch in seinen Ausführungen einschränkend darauf hin, dass Individuen mit leichter bis moderater Ausdauertrainingsintensität keine bzw. maximal geringfügige Anpassungen (1 g/kg KG/d gegenüber 0,8 g/kg KG/d (nach DGE und WHO-Empfehlung)) der täglichen Proteinaufnahme vornehmen müssen, um eine Stickstoffnullbilanzierung zu erreichen. Auch Kreider et al. (1993), deren Arbeit in Kapitel 1.2 bereits aufgegriffen wurde, beziehen die angepassten Empfehlungen für eine erhöhte Proteinaufnahme auf intensive repetitive Ausdauerbelastungen mit $\dot{V}O_2\text{max}$ mindestens größer als 50 %. Aufgrund dessen kann spekuliert werden, dass der durch die Trainingsart geringfügig erhöhte Bedarf an Proteinen bzw. EAA unter den Trainingsbedingungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit vorzufinden waren, bereits über die tägliche Ernährung hinreichend gedeckt wurde. Eine zusätzliche Verabreichung führte daher vermutlich nicht zu einer stimulierten Angiogeneese und einer Zunahme der Myoglobin-Moleküle, zumindest nicht stellvertretend anhand der erhobenen Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsparameter. Der Nachweis von statistisch relevanten Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsentwicklungen in beiden Gruppen ohne Erfassung eines Interventionseffektes kann als Beleg gedeutet werden, dass die tägliche AS-Aufnahme ohne Supplementierung bereits ausreichend war, um den Adaptionsprozess vollumfänglich zu unterstützen.

Auch wenn der Forschungsstand bisher auf diesem Gebiet begrenzt ist, ist der hier nachgewiesene negative Trend auf die Ausdauerleistungsfähigkeit in Übereinstimmung mit anderen Arbeiten. Macdermid und Stannard (2006) verglichen eine mittels Proteinpulver angereicherte Diät (3,3 g/kg KG/d Protein) mit einer isokalorischen kohlenhydratreichen (1,3 g/kg KG/d) über einen relativ kurzen Zeitraum von 7 d hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Leistung bei einem

Ergometertest. Im Anschluss an die diätetische Intervention zeigten sich signifikante Leistungseinbußen beim Zeitfahren auf dem Radergometer, wenn die Probanden sich zuvor über 7 d proteinreich ernährt hatten (153 ± 36 min nach Protein-Diät vs. 127 ± 34 nach Kohlenhydrate-Diät, $p = 0,01$). Auch eine längerfristige Anreicherung (10 Wochen) der Nahrung durch 50 g Molkenprotein täglich zusätzlich zur gewohnten Mischkost führte zu Leistungseinschränkungen im Vergleich mit einer Placebo-Gruppe bei einem Zeitlauf als gewählttem Testmodus (Roberson et al., 2018).

Es stellt sich die Frage, wie sich diese Ergebnisse interpretieren lassen. Wenn AS respektive Proteine zur diätetischen Unterstützung der Leistungsentwicklung bei Ausdauer- und Kraftausdauerbelastungen in höheren Verabreichungsdosierungen über die empfohlene Tagesmenge hinaus aufgenommen werden, scheint dies nicht die Anpassungsprozesse zu unterstützen und die Ausdauer- und Kraftausdauerleistung nicht signifikant zu steigern. Die bisherigen Daten zu dieser Fragestellung sind jedoch nicht ausreichend, um dies umfassend beurteilen zu können. Nach ausgiebiger Recherche sind keine Daten vorhanden, die positive Auswirkungen einer mittel- bis langfristigen Protein- oder AS-Supplementierung auf Ausdauerleistungsparameter belegen.

Bezüglich theoretischer Erklärungsansätze kann nur anhand der bisherigen biochemischen Erkenntnisse spekuliert werden. Die Ergebnisse von Breen et al. (2011) deuten darauf hin, dass die Verabreichung von Proteinen nach Ausdauerbelastungen die myofibrilläre, aber nicht die mitochondriale Proteinsynthese stimuliert. Demzufolge erscheint es möglich, dass die mitochondriale Synthese durch die zusätzliche Anregung der myofibrillären Proteinbildung infolge des Anstiegs der plasmatischen AS-Konzentration kompetitiv beeinträchtigt wird. Mit dieser Hypothese sind jedoch die Ergebnisse von Ferguson-Stegall et al. (2011) nicht in Einklang zu bringen. Deren Forschungsgruppe konnte nachweisen, dass die Aktivität der Citrat-Synthase und der Succinat-Dehydrogenase nach 4,5-wöchigem hochintensiven Ausdauertraining unabhängig von Protein-, Kohlenhydrate- oder Placebo-Supplementierung in allen drei Gruppen gleichmäßig anstieg.

AS können ebenso wie Kohlenhydrate und Fettsäuren als Energieträger während Ausdauerbelastungen dienen (siehe 1.1). Die Effizienz dieses Energiegewinnungsprozesses ist jedoch im Vergleich zu der effizienteren Metabolisierung von Kohlenhydraten eingeschränkt. Während der Verwendung von AS als Energieträger im Stoffwechsel werden Metaboliten aus dem Citratzyklus entzogen, was die zelluläre ATP-Synthese beeinträchtigt. So lässt sich vermuten, dass die erhöhte Zufuhr von AS und/oder Proteinen zu einer vermehrten Verstoffwechslung dieser als Energieträger führt und dass die daraus folgende Belastung des zellulären Energiehaushaltes die Bereitstellung von ATP für ausdauernde Belastungen beeinträchtigt (Wagenmakers, 1998). Zudem ist es denkbar, dass in Zeiten vermehrter Aufnahme

von AS und Proteinen weniger Kohlenhydrate über die tägliche Ernährung aufgenommen werden, da Proteine und Kohlenhydrate mit jeweils 4 kcal/g äquivalente physiologische Brennwerte besitzen (Persson, 2017). Eine verminderte Aufnahme von Kohlenhydraten verringert die Anhäufung von Glykogen in der quergestreiften Muskulatur und führt daher unter Belastung einerseits zu geringeren Energiereserven und andererseits zu einem gesteigerten Umsatz glucogener AS zur Energiegewinnung, was, wie in Kapitel 1.6 beschrieben, die Effizienz der ATP-Synthese herabsetzt. Insgesamt können bis zu 15% der bereitgestellten Energie aus AS gewonnen werden (Vaupel und Biesalski, 2018).

Die bisherigen Erkenntnisse zur Fragestellung der Wirkung von AS und Proteinen auf Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsparameter sind unzureichend und es besteht ein Forschungsdefizit, das durch weitere Untersuchungen reduziert werden sollte. Es sollte in zukünftigen Arbeiten analysiert werden, ob die beobachteten Leistungseinschränkungen respektive fehlenden signifikanten Interventionseffekte bei ausdauernden Belastungen in größeren Probandenkollektiven und längerfristigen Untersuchungszeiträumen reproduziert werden können, wenn Proteine oder AS in engem zeitlichen Zusammenhang verabreicht und über die empfohlenen Richtwerte (siehe 1.2) hinaus aufgenommen werden.

Im Kontext der bisherigen Forschung auf dem Gebiet und der Ergebnisse dieser Studie kann Ausdauerathleten, insbesondere Freizeitsportlern mit leichtem bis moderatem Trainingsumfang und entsprechender -intensität, wie durch das Probandenkollektiv der vorliegenden Arbeit abgebildet, eine zusätzliche Aufnahme von Proteinen oder AS durch Präparate oder die tägliche Ernährung nach derzeitigem Erkenntnisstand nicht empfohlen werden. Bei Individuen, die über ihre tägliche Ernährung eine ausreichende Verfügbarkeit von AS und Proteinen nicht gewährleisten können, bietet sich eine Supplementierung in Form vorgefertigter Präparate als schnell verfügbare und hochdosierte Quelle an, um die für Ausdauerbelastungen notwendigen Anpassungsprozesse in der Skelettmuskulatur, wie die Zunahme der Mitochondriendichte, die Kapillarisation der Gewebe und die Zunahme der Enzyme des oxidativen Stoffwechsels durch eine ausgeglichene Stickstoffbilanz und anabole Stoffwechselsituation zu unterstützen. Es sollte jedoch neben einer bedarfsgerechten Protein- und AS-Versorgung die Kohlenhydratezufuhr, mit dem Ziel, ausreichende Glykogenreserven aufzubauen, für Ausdauer- und Kraftausdauerathleten im Vordergrund stehen. Nachweislich stellt Glucose sowohl bei hochintensiven anaeroben als auch bei weniger intensiven aeroben Ausdauerprozessen die bedeutendste Energiequelle dar (Kopp und Nieß, 2018).

6 Zusammenfassung

Proteinhydrolysate und AS-Präparate spielen aktuell eine bedeutende Rolle im Breiten- und Leistungssport. Vor Studienbeginn gab es bereits umfangreiche Erkenntnisse in der wissenschaftlichen Literatur zur Wirkung und zum Einfluss einer entsprechenden Supplementierung von Protein- und AS-Präparaten auf die Entwicklung von Maximalkraft und Körperzusammensetzungsparametern bei Kombination mit repetitiven Krafttrainingsstimuli. Wie sich hingegen die mittel- bis langfristige Erhöhung der täglichen AS- und Proteinzufuhr auf die Leistungsentwicklung bei Kraftausdauer- und Ausdauerbelastungen auswirkt, war bislang unzureichend untersucht. Es sollte daher primär die Fragestellung beantwortet werden, ob sich die zusätzliche Verabreichung von EAA positiv auf die Entwicklung von Parametern der Kraftausdauer und Ausdauer im Rahmen eines Kraftausdauer- und Ausdauertrainingsprogrammes auswirkt. Zusätzlich sollte evaluiert werden, ob Maximalkraft und Körperzusammensetzung durch diese diätetische Intervention positiv beeinflusst werden können.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der vorliegenden Studie über einen sechswöchigen Interventionszeitraum in einem randomisierten und durch ein Placebo kontrollierten Studiendesign mit doppelter Verblindung die Auswirkungen einer gewichtsadaptierten Verabreichung eines EAA-Präparates während eines Kraftausdauer- und Ausdauertrainings auf ausgewählte Kraft-, Kraftausdauer- und Ausdauerparameter analysiert. Die Untersuchungen wurden an einem 44 männliche Probanden umfassenden Kollektiv von Nicht- und Freizeitsportlern im Alter von 18 bis 35 Jahren durchgeführt. Hierzu wurde das Präparat ‚Amino4U®‘ der Firma Sveru Sport & Vertrieb GmbH eingesetzt, das aus den acht essenziellen AS besteht. Das Mittel wurde jeweils vor und nach den dreimal wöchentlich durchgeführten Trainingseinheiten durch die Probanden der Interventionsgruppe eingenommen. Zur Messung der Körperzusammensetzung (Körperfettanteil, FFM, Wasseranteil) wurde die BIA eingesetzt. Die Maximalkraft wurde durch 1-RM an den Übungen Bankdrücken, Latzug und Beinpresse erfasst; davon abgeleitet wurde die Kraftausdauerentwicklung durch die maximale Anzahl an Wiederholungen bei 60% der 1-RM an den gleichen Testübungen untersucht. Die Ausdauerleistung wurde mit dem PWC₁₇₀-Belastungsprotokoll am Radergometer und anhand der Erholungs- und Ruheherzfrequenz beurteilt.

Der konzipierte Trainingsplan zeigte sich wirksam bei der Entwicklung der untersuchten Parameter. Zeiteffekte konnten in den Parametern FFM, Gewicht, Ausdauerleistung, Erholungsherzfrequenz und bei der Maximalkraft sowie Kraftausdauer in allen drei untersuchten Übungen festgestellt werden. Die Entwicklung der Körperzusammensetzung unterschied sich zwischen den beiden Gruppen nicht signifikant. Bei der Maximalkraftentwicklung bestand ein

signifikanter Interaktionseffekt in der Übung Beinpresse und es zeigte sich eine tendenziell größere Zunahme in den Übungen Latzug und Bankdrücken in der Interventionsgruppe. Obwohl der Fokus des Studiendesigns auf der Untersuchung und Steigerung der Kraftausdauer- und Ausdauerfähigkeiten lag, waren diese Ergebnisse wenig überraschend, da in der wissenschaftlichen Literatur zahlreiche Belege für die Effektivität von AS- und Proteinsupplementen auf die Maximalkraftentwicklung existieren. Bei der Untersuchung der Ausdauer- und Kraftausdauerleistungsparameter konnten keine signifikanten Interaktionseffekte durch die Supplementierung nachgewiesen werden. Auch fiel die Entwicklung der Ausdauer und Kraftausdauer in der Interventionsgruppe tendenziell geringer aus. Diese Ergebnisse sind jedoch in Übereinstimmung mit den wenigen bisher durchgeführten Forschungsarbeiten zu dieser Fragestellung.

Ob sich durch eine Protein- oder AS-Aufnahme über die bedarfsgerechte tägliche Aufnahme hinaus bei regelmäßigen Kraftausdauer- und Ausdauerbeanspruchungen keine Vorteile bei der Entwicklung von Leistungsparametern ergeben, kann durch die vorliegende Arbeit und anhand des aktuellen Forschungsstands nicht hinreichend geklärt werden. Die vorliegende Untersuchung wurde durch einen relativ kurzen Interventionszeitraum und fehlende Kontrolle der Kovariable Energieaufnahme sowie durch partielle Inhomogenitäten im Probandenkollektiv limitiert. Zur Klärung dieser Fragestellung wären in Zukunft Arbeiten mit größeren Probandenkollektiven und längeren Interventionszeiträumen sowie einer Begrenzung auf entweder Ausdauer- oder Kraftausdauerparameter anzustreben. Weiterhin sollte die Energieaufnahme durch Ernährungsprotokolle kontrolliert werden. Wird auch in weiteren Studien nachgewiesen, dass die zusätzliche Protein- und AS-Aufnahme die Leistungsentwicklung bei Ausdauer- und Kraftausdauerbelastungen nicht positiv beeinflusst, ist in zukünftigen Forschungsbestrebungen auch der Frage nachzugehen, wie sich diese Beobachtungen erklären lassen.

Hinsichtlich der Fragestellung von Verbesserung der Maximalkraft bei Krafttraining durch Proteinhydrolysate und AS-Präparate existieren umfangreiche Untersuchungen, in denen positive Effekte nachgewiesen werden, und die teilweise auch durch die vorliegende Arbeit bestätigt werden konnten. Die molekularen Grundlagenforschungen zeigen, dass lediglich die EAA für eine anabole Situation im Muskelproteinstoffwechsel notwendig sind und dass das Fehlen von NEAA kompensiert werden kann. In zukünftigen Untersuchungen sollte daher geklärt werden, ob sich die Supplementierung von EAA beim Versuch die Anpassungsvorgänge an Kraft- und Hypertrophietraining zu unterstützen gleich effektiv oder möglicherweise effektiver auswirkt als die Supplementierung mittels Proteinhydrolysaten, die alle proteinogenen AS enthalten. Umfassende und vergleichende Arbeiten fehlen aktuell zu dieser Fragestellung.

7 Literaturverzeichnis

Addis, T: Glomerular nephritis, diagnosis and treatment, Macmillan Co, New York, 1948

Anthony JC, Yoshizawa F, Anthony TG, Vary TC, Jefferson LS, Kimball SR (2000) Leucine stimulates translation initiation in skeletal muscle of postabsorptive rats via a rapamycin-sensitive pathway. *J Nutr* 130:2413–2419

Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Orris S, Scheiner M, Gonzalez A, Peacock CA (2015) A high protein diet (3.4 g/kg/d) combined with a heavy resistance training program improves body composition in healthy trained men and women--a follow-up investigation. *J Int Soc Sports Nutr* 12:39

Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Vargas L, Tamayo A, Buehn R, Peacock CA (2016) A High Protein Diet Has No Harmful Effects: A One-Year Crossover Study in Resistance-Trained Males. *J Nutr Metab* 2016:9104792

Areta JL, Burke LM, Ross ML, Camera DM, West DWD, Broad EM, Jeacocke NA, Moore DR, Stellingwerff T, Phillips SM, Hawley JA, Coffey VG (2013) Timing and distribution of protein ingestion during prolonged recovery from resistance exercise alters myofibrillar protein synthesis. *J Physiol* 591:2319–2331

BC-545N Bedienungsanleitung, Tanita Corporation (2012), Hg. v. Tanita Corporation. online verfügbar unter <https://tanita.de/media/wysiwyg/manuals/home-use/body-composition-monitors/bc-545n-instruction-manual.pdf>. zuletzt zugegriffen: 24. November 2019

Biolo G, Gastaldelli A, Zhang XJ, Wolfe RR (1994) Protein synthesis and breakdown in skin and muscle: A leg model of amino acid kinetics. *Am J Physiol* 267:E467-474

Biolo G, Maggi SP, Williams BD, Tipton KD, Wolfe RR (1995) Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans. *Am J Physiol* 268:E514-520

Biolo G, Tipton KD, Klein S, Wolfe RR (1997) An abundant supply of amino acids enhances the metabolic effect of exercise on muscle protein. *Am J Physiol* 273:E122-129

Biolo G, Williams BD, Fleming RY, Wolfe RR (1999) Insulin action on muscle protein kinetics and amino acid transport during recovery after resistance exercise. *Diabetes* 48:949–957

Bohé J, Low JF, Wolfe RR, Rennie MJ (2001) Latency and duration of stimulation of human muscle protein synthesis during continuous infusion of amino acids. *J Physiol* 532:575–579

Bohé J, Low A, Wolfe RR, Rennie MJ (2003) Human muscle protein synthesis is modulated by extracellular, not intramuscular amino acid availability: A dose-response study. *J Physiol* 552:315–324

- Böhm A, Heitmann BL (2013) The use of bioelectrical impedance analysis for body composition in epidemiological studies. *Eur J Clin Nutr* 67:79-85
- Børsheim E, Tipton KD, Wolf SE, Wolfe RR (2002) Essential amino acids and muscle protein recovery from resistance exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 283:E648-657
- Breen L, Tipton KD, Jeukendrup AE (2010) No effect of carbohydrate-protein on cycling performance and indices of recovery. *Med Sci Sports Exerc* 42:1140–1148
- Breen L, Philp A, Witard OC, Jackman SR, Selby A, Smith K, Baar K, Tipton KD (2011) The influence of carbohydrate-protein co-ingestion following endurance exercise on myofibrillar and mitochondrial protein synthesis. *J Physiol* 589:4011–4025
- Brenner BM, Meyer TW, Hostetter TH (1982) Dietary protein intake and the progressive nature of kidney disease: The role of hemodynamically mediated glomerular injury in the pathogenesis of progressive glomerular sclerosis in aging, renal ablation, and intrinsic renal disease. *N Engl J Med* 307:652–659
- Bringmann W, Wrobel K, Müller E (1990) Die Ergometrie als Bestandteil der sportärztlichen Untersuchung. *Z Arztl Fortbild* 84:579–586
- Burd NA, West DWD, Moore DR, Atherton PJ, Staples AW, Prior T, Tang JE, Rennie MJ, Baker SK, Phillips SM (2011) Enhanced amino acid sensitivity of myofibrillar protein synthesis persists for up to 24 h after resistance exercise in young men. *J Nutr* 141:568–573
- Cermak NM, Res PT, de Groot, Lisette C. P. G. M., Saris WHM, van Loon LJC (2012) Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: A meta-analysis. *Am J Clin Nutr* 96:1454–1464
- Cintineo HP, Arent MA, Antonio J, Arent SM (2018) Effects of Protein Supplementation on Performance and Recovery in Resistance and Endurance Training. *Front Nutr* 5:1–9
- Dickhuth H-H, Röcker K, Mayer F, König D, Korsten-Reck U (2004) Ausdauersport und kardiale Adaptation (Sportherz). *Herz* 29:373–380
- Ehlenz, H; Grosser, M; Zimmermann, E: Krafttraining: Grundlagen, Methoden, Übungen, Leistungssteuerung, Trainingsprogramme. 6. erw. Aufl., BLV, München, 1998, S. 67, 71
- Eisenkölbl J, Kartasurya M, Widhalm K (2001) Underestimation of percentage fat mass measured by bioelectrical impedance analysis compared to dual energy X-ray absorptiometry method in obese children. *Eur J Clin Nutr* 55:423–429
- Erskine RM, Fletcher G, Hanson B, Folland JP (2012) Whey protein does not enhance the adaptations to elbow flexor resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 44:1791–1800

- Faigenbaum AD, McFarland JE, Herman RE, Naclerio F, Ratamess NA, Kang J, Myer GD (2012) Reliability of the one-repetition-maximum power clean test in adolescent athletes. *J Strength Cond Res* 26:432–437
- Ferguson-Stegall L, McCleave E, Ding Z, Doerner Iii PG, Liu Y, Wang B, Healy M, Kleinert M, Dessard B, Lassiter DG, Kammer L, Ivy JL (2011) Aerobic exercise training adaptations are increased by postexercise carbohydrate-protein supplementation. *J Nutr Metab* 2011:623182
- Folland JP, Williams AG (2007) The adaptations to strength training: Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med* 37:145–168
- Friedman JE, Lemon PW (1989) Effect of chronic endurance exercise on retention of dietary protein. *Int J Sports Med* 10:118–123
- Giordano M, Castellino P, DeFronzo RA (1996) Differential responsiveness of protein synthesis and degradation to amino acid availability in humans. *Diabetes* 45:393–399
- Grosser, M; Starischka, S; Zimmermann, E; Eisenhut, A: *Das neue Konditionstraining: Für alle Sportarten, für Kinder, Jugendliche und Aktive*. 9. überarb. Aufl., BLV, München, 2004, S. 41, 48, 128
- Heblich F, Gröbel H, Hauptmann M (2018) Criticizing German medical fitness tests for fire-fighters. *Dtsch Z Sportmed* 2018:5–12
- Herda AA, Herda TJ, Costa PB, Ryan ED, Stout JR, Cramer JT (2013) Muscle performance, size, and safety responses after eight weeks of resistance training and protein supplementation: A randomized, double-blinded, placebo-controlled clinical trial. *J Strength Cond Res* 27:3091–3100
- Hoffer LJ (2016) Human Protein and Amino Acid Requirements. *J Parenter Enteral Nutr* 40:460–474
- Hoffman JR, Ratamess NA, Kang J, Falvo MJ, Faigenbaum AD (2007) Effects of protein supplementation on muscular performance and resting hormonal changes in college football players. *J Sports Sci Med* 6:85–92
- Hofmann, P; Müller, A; Tschakert, G: Gütekriterien, Protokolle und Spezial-Ergometrien zur Belastungsuntersuchung. In: Wonisch M, Hofmann P, Förster H, Hörtnagl H, Ledl-Kurkowski E, Pokan R (Hrsg): *Kompendium der Sportmedizin. Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie*. Springer, Wien, 2017, S. 71-92
- Höhne, W: Aminosäuren. In: Püschel G, Kühn H, Kietzmann T, Höhne W, Christ B, Doenecke D, Koolman J (Hrsg): *Taschenlehrbuch Biochemie*. Thieme, Stuttgart, 2011, S. 63-91

- Hollmann, W; Strüder, HK; Predel, H-G; Tagarakis, CVM: Spiroergometrie. Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik des Gesunden und Kranken. 1. Aufl., Schattauer GmbH Verlag für Medizin und Naturwissenschaften, Stuttgart, 2006, S. 64
- Hottenrott K, Neumann G (2006) Einfluss essentieller Aminosäuren auf die Muskelkraft. Medical Triathlon World:20–23
- Ihle BU, Becker GJ, Whitworth JA, Charlwood RA, Kincaid-Smith PS (1989) The effect of protein restriction on the progression of renal insufficiency. N Engl J Med 321:1773–1777
- Jäger R, Kerksick CM, Campbell BI, Cribb PJ, Wells SD, Skwiat TM, Purpura M, Ziegenfuss TN, Ferrando AA, Arent SM, Smith-Ryan AE, Stout JR, Arciero PJ, Ormsbee MJ, Taylor LW, Wilborn CD, Kalman DS, Kreider RB, Willoughby DS, Hoffman JR, Krzykowski JL, Antonio J (2017) International Society of Sports Nutrition Position Stand: Protein and exercise. J Int Soc Sports Nutr 14:1–20
- Kindermann, W; Dickhuth, H-H; Nieß, A; Röcker, K; Urhausen, A: Sportkardiologie: Körperliche Aktivität Bei Herzerkrankungen, Springer, Dordrecht, 2007, S. 4-5, 41-42, 47
- Kopp, C; Nieß, A: Sport und Ernährung. In: Biesalski H-K, Bischoff SC, Pirlich M, Weimann A (Hrsg): Ernährungsmedizin. Nach dem Curriculum Ernährungsmedizin der Bundesärztekammer. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 2018, S. 406-418
- Kraemer, WJ; Ratamess, NA; Fry, AC; French, DN: Strength Training: Development and Evaluation of Methodology. In: Maud PJ, Foster C (Hrsg): Physiological assessment of human fitness. Human Kinetics, Champaign, 2006, pp. 119–150
- Kreider RB, Miriel V, Bertun E (1993) Amino acid supplementation and exercise performance. Analysis of the proposed ergogenic value. Sports Med 16:190–209
- Kyle UG, Bosaeus I, Lorenzo AD de, Deurenberg P, Elia M, Gómez JM, Heitmann BL, Kent-Smith L, Melchior J-C, Pirlich M, Scharfetter H, Schols AMWJ, Pichard C (2004a) Bioelectrical impedance analysis--part I: Review of principles and methods. Clin Nutr 23:1226–1243
- Kyle UG, Bosaeus I, Lorenzo AD de, Deurenberg P, Elia M, Manuel Gómez J, Lilienthal Heitmann B, Kent-Smith L, Melchior J-C, Pirlich M, Scharfetter H, M W J Schols A, Pichard C (2004b) Bioelectrical impedance analysis-part II: Utilization in clinical practice. Clin Nutr 23:1430–1453
- Lawrence ME, Kirby DF (2002) Nutrition and sports supplements: Fact or fiction. J Clin Gastroenterol 35:299–306

- Levenhagen DK, Gresham JD, Carlson MG, Maron DJ, Borel MJ, Flakoll PJ (2001) Postexercise nutrient intake timing in humans is critical to recovery of leg glucose and protein homeostasis. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 280:E982-993
- Levinger I, Goodman C, Hare DL, Jerums G, Toia D, Selig S (2009) The reliability of the 1RM strength test for untrained middle-aged individuals. *J Sci Med Sport* 12:310–316
- Löllgen, H: Definition und Methodik. In: Löllgen H, Erdmann E, Gitt AK (Hrsg): Ergometrie. Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 3-8
- Löllgen, H; Fahrenkrog, U; Völker, K; Bachl, N; Kinzlbauer, M: Allgemeine Aspekte der Ergometrie. In: Löllgen H, Erdmann E, Gitt AK (Hrsg): Ergometrie. Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010a, S. 21-43
- Löllgen, H; Fahrenkrog, U; Löllgen, D: Allgemeine Aspekte ergometrischer Messgrößen. In: Löllgen H, Erdmann E, Gitt AK (Hrsg): Ergometrie. Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010b, S. 61-83
- Louard RJ, Barrett EJ, Gelfand RA (1990) Effect of infused branched-chain amino acids on muscle and whole-body amino acid metabolism in man. *Clin Sci* 79:457–466
- Macdermid PW, Stannard SR (2006) A whey-supplemented, high-protein diet versus a high-carbohydrate diet: Effects on endurance cycling performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 16:65–77
- Mamerow MM, Mettler JA, English KL, Casperson SL, Arentson-Lantz E, Sheffield-Moore M, Layman DK, Paddon-Jones D (2014) Dietary protein distribution positively influences 24-h muscle protein synthesis in healthy adults. *J Nutr* 144:876–880
- Martin WF, Armstrong LE, Rodriguez NR (2005) Dietary protein intake and renal function. *Nutr Metab* 2:25
- McMaster DT, Gill N, Cronin J, McGuigan M (2014) A brief review of strength and ballistic assessment methodologies in sport. *Sports Med* 44:603–623
- Miller SL, Tipton KD, Chinkes DL, Wolf SE, Wolfe RR (2003) Independent and combined effects of amino acids and glucose after resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 35:449–455
- Mobley CB, Haun CT, Roberson PA, Mumford PW, Romero MA, Kephart WC, Anderson RG, Vann CG, Osburn SC, Pledge CD, Martin JS, Young KC, Goodlett MD, Pascoe DD, Lockwood CM, Roberts MD (2017) Effects of Whey, Soy or Leucine Supplementation with 12 Weeks of Resistance Training on Strength, Body Composition, and Skeletal Muscle and Adipose Tissue Histological Attributes in College-Aged Males. *Nutrients* 9:972

- Moore DR, Robinson MJ, Fry JL, Tang JE, Glover EI, Wilkinson SB, Prior T, Tarnopolsky MA, Phillips SM (2009) Ingested protein dose response of muscle and albumin protein synthesis after resistance exercise in young men. *Am J Clin Nutr* 89:161–168
- Moore DR, Camera DM, Areta JL, Hawley JA (2014) Beyond muscle hypertrophy: Why dietary protein is important for endurance athletes. *Appl Physiol Nutr Metab* 39:987–997
- Müller EA (1938) Der Einfluß der Sattelstellung auf das Arbeitsmaximum und den Wirkungsgrad beim Radfahren. *Eur J Appl Physiol* 10:1–7
- Murphy CH, Hector AJ, Phillips SM (2015) Considerations for protein intake in managing weight loss in athletes. *Eur J Sport Sci* 15:21–28
- Nair KS, Schwartz RG, Welle S (1992) Leucine as a regulator of whole body and skeletal muscle protein metabolism in humans. *Am J Physiol* 263:E928-934
- Nuhn, P: *Naturstoffchemie: Mikrobielle, pflanzliche und tierische Naturstoffe ; mit 106 Tabellen.* 2. neu bearb. u. erw. Aufl., Hirzel, Stuttgart, 1990, S. 70
- Pasiakos SM, McLellan TM, Lieberman HR (2015) The effects of protein supplements on muscle mass, strength, and aerobic and anaerobic power in healthy adults: A systematic review. *Sports Med* 45:111–131
- Persson, PB: *Energie- und Wärmehaushalt, Thermoregulation.* In: Schmidt RF, Lang F, Heckmann M (Hrsg): *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie : mit Online-Repetitorium.* Springer, Berlin, 2017, S. 834-853
- Phillips SM, Tipton KD, Aarsland A, Wolf SE, Wolfe RR (1997) Mixed muscle protein synthesis and breakdown after resistance exercise in humans. *Am J Physiol* 273:E99-107
- Polar RS800CX Gebrauchsanleitung | Deutsch, Polar Electro Oy (30.04.2018), Hg. v. Polar Electro Oy. online verfügbar unter https://support.polar.com/e_manuals/RS800CX/Polar_RS800CX_user_manual_Deutsch/ch12.html#Technical_Specifications. zuletzt zugegriffen: 24. November 2019
- Power im Proteinmarkt, Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft (2018), Hg. v. Informationsdienst des Instituts der deutschen Wirtschaft. online verfügbar unter <https://www.iwd.de/artikel/power-im-proteinmarkt-396663>. zuletzt zugegriffen: 24. November 2019
- Rasmussen BB, Tipton KD, Miller SL, Wolf SE, Wolfe RR (2000) An oral essential amino acid-carbohydrate supplement enhances muscle protein anabolism after resistance exercise. *J Appl Physiol* 88:386–392

- Rassow, J: Abbau von Proteinen und Aminosäuren. In: Rassow J, Hauser K, Netzker R, Deutzmann R (Hrsg): Biochemie. Thieme, Stuttgart, 2016a, S. 147–173
- Rassow, J: Die molekulare Struktur der wichtigsten Nahrungsstoffe: Kohlenhydrate, Triacylglycerine und Aminosäuren. In: Rassow J, Hauser K, Netzker R, Deutzmann R (Hrsg): Biochemie. Thieme, Stuttgart, 2016b, S. 45-72
- Referenzwerte Protein, DGE (21.09.2017), Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. online verfügbar unter <https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/protein/>. zuletzt zugegriffen: 24. November 2019
- Rivera-Brown AM, Frontera WR (2012) Principles of exercise physiology: Responses to acute exercise and long-term adaptations to training. *PM R* 4:797–804
- Roberson PA, Romero MA, Mumford PW, Osburn SC, Haun CT, Vann CG, Kluess HA, Roberts MD (2018) Protein Supplementation Throughout 10 Weeks of Progressive Run Training Is Not Beneficial for Time Trial Improvement. *Front Nutr* 5:1–10
- Rodriguez NR, Di Marco NM, Langley S (2009) American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc* 41:709–731
- Röhm, K-H: Prinzipien von Aminosäurestoffwechsel und Stickstoffumsatz. In: Heinrich PC, Müller M, Graeve L, Löffler G (Hrsg): Löffler/Petrides Biochemie und Pathobiochemie. Springer, Berlin, 2014, S. 313-324
- S 1- Leitlinie Vorsorgeuntersuchung im Sport, Lollgen H, Hansel J (2007), Hg. v. Deutsche Gesellschaft für Sportmedizin und Prävention. online verfügbar unter <https://www.dgsp.de/seite/278046/leitlinie-sportmed.-untersuchung.html>. zuletzt zugegriffen: 24. November 2019
- Saunders MJ, Kane MD, Todd MK (2004) Effects of a carbohydrate-protein beverage on cycling endurance and muscle damage. *Med Sci Sports Exerc* 36:1233–1238
- Schardt, F: Kardiopulmonale Leistungsdiagnostik. 1. Aufl., MKM Marketinginst, Lenggries, 2005, S. 84-89
- Schoenfeld BJ, Aragon AA, Krieger JW (2013) The effect of protein timing on muscle strength and hypertrophy: A meta-analysis. *J Int Soc Sports Nutr* 10:53
- Sergi G, Rui M de, Stubbs B, Veronese N, Manzato E (2017) Measurement of lean body mass using bioelectrical impedance analysis: A consideration of the pros and cons. *Aging Clin Exp Res* 29:591–597

- Tang JE, Moore DR, Kujbida GW, Tarnopolsky MA, Phillips SM (2009) Ingestion of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate: Effects on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. *J Appl Physiol* 107:987–992
- Tarnopolsky M (2004) Protein requirements for endurance athletes. *Nutrition* 20:662–668
- Thibault R, Genton L, Pichard C (2012) Body composition: Why, when and for who? *Clin Nutr* 31:435–447
- Tipton KD, Gurkin BE, Matin S, Wolfe RR (1999) Nonessential amino acids are not necessary to stimulate net muscle protein synthesis in healthy volunteers. *J Nutr Biochem* 10:89–95
- Tipton KD, Rasmussen BB, Miller SL, Wolf SE, Owens-Stovall SK, Petrini BE, Wolfe RR (2001) Timing of amino acid-carbohydrate ingestion alters anabolic response of muscle to resistance exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 281:E197-206
- Trappe HJ, Löllgen H (2000) Leitlinien zur Ergometrie. *Z Kardiol* 89:821–831
- van Essen M, Gibala MJ (2006) Failure of protein to improve time trial performance when added to a sports drink. *Med Sci Sports Exerc* 38:1476–1483
- Vaupel, P; Biesalski, H-K: Proteine. In: Biesalski H-K, Bischoff SC, Pirlich M, Weimann A (Hrsg): *Ernährungsmedizin. Nach dem Curriculum Ernährungsmedizin der Bundesärztekammer*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 2018, S. 145-163
- Volpi E, Kobayashi H, Sheffield-Moore M, Mittendorfer B, Wolfe RR (2003) Essential amino acids are primarily responsible for the amino acid stimulation of muscle protein anabolism in healthy elderly adults. *Am J Clin Nutr* 78:250–258
- Von Powerriegel bis Eiweißshake: Viele Verbraucher setzen auf Fitnessfood, Kreutz H (2018), Hg. v. Bundeszentrum für Ernährung. online verfügbar unter <https://www.bzfe.de/inhalt/von-powerriegel-bis-eiweissshake-32657.html>. zuletzt zugegriffen: 13. Januar 2019
- Wagenmakers AJ (1998) Muscle amino acid metabolism at rest and during exercise: Role in human physiology and metabolism. *Exerc Sport Sci Rev* 26:287–314
- Wahlund H (1948) Determination of the Physical Working Capacity. A Physiological and Clinical Study with special reference to Standardization of Cardio-Pulmonary Functional Tests. *Acta Med Scand* 132:78
- Ward LC (2012) Segmental bioelectrical impedance analysis: An update. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 15:424–429
- Weisgarber KD, Candow DG, Vogt ESM (2012) Whey protein before and during resistance exercise has no effect on muscle mass and strength in untrained young adults. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 22:463–469

WHO/FAO/UNU: Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation. WHO technical report series 935, World health organization, Geneva, 2007, pp. 12, 126, 149-150,

Wolfe RR (2017) Branched-chain amino acids and muscle protein synthesis in humans: Myth or reality? *J Int Soc Sports Nutr* 14:1–30

8 Thesen

1. Die zusätzliche Aufnahme von essenziellen Aminosäuren neben der gewohnten Mischkost kann die bei einem Kraftausdauer- und Ausdauertraining auftretende Zunahme der Maximalkraft positiv beeinflussen.
2. Die bei Kraftausdauer- und Ausdauertraining auftretende Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit wird durch die zusätzliche Aufnahme von essenziellen Aminosäuren neben der gewohnten Mischkost nicht gefördert.
3. Die durch ein Ausdauer- und Kraftausdauertraining induzierte Veränderung der Körperzusammensetzung im Sinne eines Zugewinns an fettfreier Masse wird durch die Einnahme von essenziellen Aminosäuren zusätzlich zur gewohnten Mischkost nicht unterstützt.

9 Anlage



Universitätsklinikum Halle (Saale)

Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie

Universitätsklinik und Poliklinik für Orthopädie
Direktor: Prof. Dr. Karl-Stefan Delank

Hausanschrift: Ernst-Grube-Str. 40 06120 Halle (Saale)

orthopaedie@uk-halle.de

www.medizin.uni-halle.de/kor/

Sekretariat des Klinikdirektors: Telefon 0345 557-4805 Telefax 0345 557-4809

Ambulanz: Telefon 0345 557-4870 Telefax 0345 557-4879

Station 1: Telefon 0345 557-4810 Telefax 0345 557-4819

Station 2: Telefon 0345 557-4820 Telefax 0345 557-4829

Station für minimalinvasive Chirurgie: Telefon 0345 557-4830 Telefax 0345 557-4839

Station 4 (Klinikum Kröllwitz): Telefon 0345 557-5203 Telefax 0345 557-5202

Tagesstation: Telefon 0345 557-4840 Telefax 0345 557-4774

Einwilligungserklärung zur Studie

Evaluierung der Wirksamkeit von Aminosäuren auf Körperzusammensetzung, Kraft- und Ausdauerleistung

Name, Vorname:

Ich bin von Frau/Herrn ausführlich und verständlich über die oben genannten Untersuchungen, die möglichen Belastungen und Risiken, meine Verhaltensweisen während der Untersuchung sowie über Wesen, Bedeutung und Tragweite der Untersuchungen und die sich daraus für mich ergebenden Anforderungen aufgeklärt worden. Ich habe darüber hinaus den Text der Probandeninformation und dieser Einwilligungserklärung genau gelesen und verstanden. Aufgetretene Fragen wurden mir verständlich und ausreichend beantwortet. Ich werde den Anordnungen, die für die Durchführung der Studie notwendig sind, Folge leisten, behalte mir aber jederzeit das Recht vor, meine freiwillige Mitarbeit zu beenden, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen. Ich bin zugleich einverstanden, dass meine Daten im Rahmen der Studie aufgezeichnet und ausgewertet, sowie in wissenschaftlich pseudonymisierter Form verarbeitet werden. Beim Umgang mit meinen Daten müssen die Bestimmungen der Datenschutzgesetze beachtet werden. Alle bei der Aufzeichnung oder Auswertung der Daten beteiligten Personen sind zu strenger Vertraulichkeit und Beachtung des Datenschutzes verpflichtet. Ich weiß, dass die Teilnahme an der o.g. Studie freiwillig ist und ich meine Einwilligung jederzeit ohne Angabe von Gründen widerrufen kann, ohne dass mir Nachteile dadurch entstehen.

[] Ich erkläre mich hiermit bereit, an der Studie „Evaluierung der Wirksamkeit von Aminosäuren auf Körperzusammensetzung, Kraft- und Ausdauerleistung“ teilzunehmen.

[] Ich habe keine weiteren Fragen

Ort, Datum Unterschrift des Probanden

Ort, Datum Name (Klarschrift) Unterschrift des Aufklärenden

Fragebogen Bewegungserfahrung

Allgemeines

Name:

Vorname:

Geburtsdatum:

Code:

Hast du aktiv eine Sportart betrieben oder betreibst sie im Moment?

Ja → wenn ja in welche Sportart

Nein

Warst oder bist du Mitglied in einem Sportverein/Fitnessstudio?

Ja → wenn ja, wie lange war oder ist die Mitgliedschaft bestehend?

Nein

An wie vielen Tagen pro Woche treibst du in diesem Verein/Studio Sport?

an mehr als drei Tagen an drei Tagen an zwei Tagen an einem Tag

Hast du bereits Erfahrungen mit dem Training an freien Gewichten (Kurzhandel, Langhandel, SZ-Stange) gesammelt?

Ja

Nein

Ausdauertrainingsplan Amino4U-Studie (Handout Probanden)

Grundsätzliches

- 1 Trainingseinheit pro Woche a 70-80 min
- 40 min Radergometer-Training oder Rudermaschine (Herzfrequenz-gesteuertes Intervall-Training, Einstellung der Belastung nach individuellem Trainingszustand)
- 20 min Stabilitätstraining mittels Körpergewichtsübungen
 - Verschiedene isometrische Stützvariationen
 - Mobilitäts- und Beweglichkeitsschulung

Ablauf

- Ankunft in der Trainingsstätte
- 1. Einnahme des Präparates
- Stabilisationstraining (ca. 10-15 min)
 - Unterarmstütz („Planking“)
 - Abdominal Roll
 - Rückenstrecker („Hyperextension“)
 - Evtl. Langarmstütz
- Warmup (Erwärmung)
 - Ca. 5 min in niedriger Intensität
- Hauptteil
 - 40 min Radergometer-Training oder Rudermaschine
 - Intervalltraining
 - 2-3 Minuten Belastungsphase im Herzfrequenzbereich 170-180 bpm
 - 4-5 Minuten Erholungsphase im Herzfrequenzbereich 120-140 bpm
- Cool-down (Ausfahren)
 - Ca. 5 min in niedriger Intensität
- Mobilisationstraining (Stretching) (ca.10 min)
- 2. Einnahme des Präparates

Krafttrainingsplan Amino4U-Studie (Handout Probanden)

Grundsätzliches

- 2 Einheiten pro Woche á 60-90 min
- 2 er Split Trainingsplan als Ganzkörperzirkeltraining
- 12 Übungen
- Intensität im Kraftausdauerbereich (20-25 Wdh.)
- 4 Sätze pro Übung (1 Satz als Warmup mit niedriger Gewichtsbelastung)
- Pausenzeiten von ca. 45 bis 90 s zwischen den Sätzen

Ablauf

1. Ankunft in Trainingsstätte
2. Einnahme des Präparates
3. Warm-up (Erwärmung)
 - 5-10 min Radergometer oder Rudermaschine (moderate Intensität)
 - 1 Warmup-Satz pro Übung
4. Hauptteil
 - 4 Sätze pro Übung (1 Warm-Up Satz)
 - 20-25 Wdh. je Satz (bei Überschreiten von mehr als 25 Wdh. Intensivierung der Gewichtsbelastung)
5. Cool-Down (Abwärmen)
 - 5 min Radergometer oder Rudermaschine (niedriger Intensität)
 - Stretching/Beweglichkeitstraining
6. 2. Einnahme des Präparates

Zirkelvariante 1 (Probanden mit keiner/wenig Bewegungs- und Trainingserfahrung)

Tag 1

1. Latzug (Maschine)
2. Bankdrücken (Maschine)
3. Rudern (Maschine)
4. Seitheben (Maschine)
5. Beinpresse
6. Bauchpresse (Maschine)

Tag 2

1. Dips (Maschine)
2. Bizepscurls (Maschine)
3. Beinbeuger (Maschine, liegend)
4. Beinstrecker (Maschine, sitzend)
5. Hyperextension (Maschine)
6. Beinheben (hängend, gebeugt)

Zirkelvariante 2 (Probanden mit moderater bis ausgeprägter Bewegungserfahrung)

Tag 1

1. Klimmzüge (Maschine, unterstützt)
2. Bankdrücken (Multipresse oder frei)
3. Rudern (Seilzug, sitzend)
4. Seitheben (frei, Kurzhantel)
5. Kniebeuge (Multipresse oder frei)
6. Sit-ups Schrägbank

Tag 2

1. Trizepsdrücken (Seilzug)
2. Bizepscurls (SZ-Stange)
3. Beinbeuger (Maschine, liegend)
4. Beinstrecker (Maschine, liegend)
5. Hyperextension (Bank)
6. Beinheben (hängend, gestreckt)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich gemäß §5 der Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Zur Durchführung der Arbeit und zur Erstellung der Dissertationsschrift wurden nur die von mir angegebenen Hilfsmittel verwendet. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Aussagen und Gedanken wurden in der Dissertationsschrift als solche kenntlich gemacht.

Ich erkläre hiermit auch, dass die vorliegende Dissertation nicht in gleicher oder ähnlicher Form bereits in einem anderen Prüfungsverfahren vorgelegen hat.

Philipp Thieke

Ort, Datum

Erklärung über vorausgegangene Promotionsversuche

Hiermit erkläre ich, dass ich keinen vorausgegangenen Promotionsversuch unternommen habe, und dass kein Promotionsversuch an einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung läuft.

Philipp Thieke

Ort, Datum

Danksagung

Ich möchte mich aufrichtig und von ganzem Herzen bei allen Menschen bedanken, die durch ihre Unterstützung und Begleitung die Vollendung dieser Dissertationsarbeit erst ermöglicht haben.

Den Herren Prof. Dr. med. Delank und Prof. Dr. phil. Schwesig möchte ich recht herzlich für die Überlassung des Themas danken. Herrn Prof. Dr. phil. René Schwesig möchte ich zusätzlich für die Bereitstellung von Messgeräten und die Unterstützung bei der Durchführung des Projektes danken.

Ein besonderer Dank gilt den Herren Dr. phil. Andreas Lauenroth und Dr. phil. Stephan Schulze für die stetige Unterstützung bei Organisation und Problemstellungen sowie die vielen hilfreichen Anregungen.

Herrn Michael Schäfer möchte ich meinen Dank aussprechen für seine Hilfe bei der Betreuung des Trainingsprogrammes sowie die zahlreichen trainingswissenschaftlichen Ratschläge.

Ein großer Dank geht an alle Probanden, die durch ihren Einsatz und ihre Bereitschaft wesentlich zum erfolgreichen Abschluss dieses Projektes beigetragen haben.

Auch möchte ich mich bei den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Clever Fit GmbH Halle für die Bereitstellung der Trainingsräume und Trainingsgeräte bedanken.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie, meinen Freunden und meiner Partnerin, Lisa-Maria Peter, danken, die mir stets eine Stütze sind und mich in allen Herausforderungen des Lebens unterstützen.