

Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten
Leistungsdiagnostik im Sportklettern

Kumulative Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der

Philosophisch-Sozialwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Augsburg

vorgelegt von Marvin Winkler

2023

Erstgutachter/in: Prof.in Dr. Claudia Augste
Zweitgutachter/in: Prof. Dr. Hans Peter Brandl-Bredenbeck
Drittgutachter/in: Prof.in Dr. Anja Göritz
Viertgutachter/in: Prof. Dr. Martin Lames
Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2023

Danksagung

Mein besonderer Dank gebührt an erster Stelle Prof.in Dr. Claudia Augste für die hervorragende Betreuung meiner Promotion – Danke Claudia, dass du mir während der gesamten Zeit stets zur Seite standest und mich immer unterstützt hast!

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. Stefan Künzell, bei Prof. Dr. Hans Peter Brandl-Bredenbeck sowie bei allen weiteren Mitarbeitern des Instituts für Sportwissenschaft für das kollegiale Arbeitsumfeld und die schöne Zeit in Augsburg bedanken. An dieser Stelle gebührt mein Dank auch Prof. Dr. Hans Peter Brandl-Bredenbeck sowie Prof.in Dr. Anja Göritz für die kurzfristige Zusage der Begutachtung der Dissertation – Danke!

Insbesondere möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, die mir durch ihre Unterstützung viele Freiräume geschaffen haben, sodass ich mich vollkommen auf die Doktorarbeit konzentrieren konnte – Danke Beate und Kay!

Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen bedanken, die mich mit ihrer Unterstützung durch diese Arbeit begleitet haben: Freunde, den wissenschaftlichen Hilfskräften und allen Probanden – Danke!

Ohne euch alle wäre diese Arbeit nicht in der vorliegenden Form zustande gekommen – Danke!

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorgelegte Arbeit zu den angegebenen Teilen selbstständig gefertigt habe, ferner, dass ich sie nicht schon als Doktorarbeit an einer anderen Hochschule oder als Teil solcher Arbeiten eingereicht habe.

Ferner erkläre ich, den Text, die Diagramme und alle weiteren Darstellungen selbstständig angefertigt bzw. die entsprechenden Quellen kenntlich gemacht zu haben.

Mir ist bekannt, dass bei Zuwiderhandlung die Doktorarbeit mit „nicht ausreichend“ bewertet wird und dass es sich bei Plagiarismus und Täuschungsversuchen um schweres akademisches Fehlverhalten handelt.

Über die Bedeutung und die strafrechtlichen Folgen einer falschen eidesstattlichen Erklärung gemäß § 156 StGB bin ich mir bewusst, daher erkläre ich an Eides statt, dass meine Angaben der Wahrheit entsprechen und ich diese nach bestem Wissen und Gewissen gemacht habe.

Darmstadt, 23.04.2023

A handwritten signature in blue ink that reads "Maxim Winkler". The signature is written in a cursive style with a large initial 'M'.

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	7
2	<i>Strukturierung sportlicher Leistungen</i>	9
2.1	Modellvorstellung zur Struktur sportlicher Leistungen	10
2.1.1	Heuristische Modelle	10
2.1.2	Leistungsstrukturmodelle mit empirischer Prüfung	11
2.1.3	Integratives Modell der sportlichen Leistung	12
2.2	Fachartikel	14
2.2.1	Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns	14
3	<i>Belastungsprofil des Wettkampfkletterns</i>	15
3.1	Belastungsprofil des Speedkletterns	16
3.1.1	Beschreibung der Disziplin	16
3.1.2	Forschungsstand	16
3.1.3	Konkludierung des Forschungsdesiderats	17
3.2	Belastungsprofil des Boulderns	18
3.2.1	Beschreibung der Disziplin	18
3.2.2	Forschungsstand	18
3.2.3	Konkludierung des Forschungsdesiderats	19
3.3	Belastungsprofil des Leadkletterns	20
3.3.1	Beschreibung der Disziplin	20
3.3.2	Forschungsstand	20
3.3.3	Konkludierung des Forschungsdesiderats	24
3.4	Fachartikel	25
3.4.1	The Load Structure in International Competitive Climbing	25
3.4.2	Athletes´performance in different boulder types at international bouldering competitions	26
3.4.3	Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering	27
4	<i>Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern</i>	28
4.1	Leistungsdiagnostik im Speedklettern	30
4.1.1	Forschungsstand zum Einfluss der einzelnen Komponenten	30
4.1.1.1	Innere Rahmenbedingungen	30
4.1.1.2	Technik	30
4.1.1.3	Kondition	30
4.1.2	Forschungsstand zu multivariaten Modellen	31

4.1.3	Konkludierung des Forschungsdesiderats	31
4.2	Leistungsdiagnostik im Bouldern	33
4.2.1	Forschungsstand zum Einfluss der einzelnen Komponenten	33
4.2.1.1	Innere Rahmenbedingungen	33
4.2.1.2	Technik	34
4.2.1.3	Kondition	34
4.2.1.4	Psychische Fähigkeiten.....	36
4.2.2	Forschungsstand zu multivariaten Modellen.....	37
4.2.3	Konkludierung des Forschungsdesiderats	37
4.3	Leistungsdiagnostik im Leadklettern.....	39
4.3.1	Forschungsstand zum Einfluss der einzelnen Komponenten	39
4.3.1.1	Innere Rahmenbedingungen	39
4.3.1.2	Technik	41
4.3.1.3	Kondition	42
4.3.1.4	Psychische Fähigkeiten.....	48
4.3.2	Forschungsstand zu multivariaten Modellen.....	49
4.3.3	Konkludierung des Forschungsdesiderats	50
4.4	Fachartikel	53
4.4.1	Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering, and Lead Climbing	53
4.4.2	Optimization of an intermittent finger endurance test for climbers regarding gender and deviation in force and pulling time.....	54
4.4.3	Predictive value of forearm muscle oxygenation parameters for intermittent finger endurance and competitive climbing performance.....	55
5	<i>Diskussion</i>	56
5.1	Hierarchisierung und Modellbildung.....	57
5.2	Priorisierung	58
5.3	Interne Ordnung	71
5.4	Konklusion.....	74
	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	75
	<i>Literaturverzeichnis</i>.....	76

1 Einleitung

Die vorliegende Doktorarbeit befasst sich mit der Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Leistungsdiagnostik im Sportklettern.

Die Relevanz des Themas ergibt sich aus folgender Diskrepanz: Die Entwicklung des Sportkletterns der letzten Jahren ist gekennzeichnet von einer zunehmenden Popularität und damit einhergehenden Professionalisierung. Besonders hervorzuheben ist hierbei, dass Sportklettern für das Jahr 2020 erstmals in den Kanon der olympischen Sportarten aufgenommen wurde und nach dessen erfolgreicher Premiere auch weiterhin als olympische Sportart¹ vertreten sein wird. Dem gegenüber steht, trotz des zunehmenden wissenschaftlichen Interesses und der steigenden Anzahl an Publikationen, ein aus sportwissenschaftlicher Perspektive dennoch erheblicher Forschungsbedarf. Dies trifft auch auf die Leistungsdiagnostik zu, der eine zentrale Rolle im Bereich der Trainingswissenschaften zukommt.

Die grundlegende Aufgabe der Trainingswissenschaft, als Teilbereich der Sportwissenschaft, besteht in der wissenschaftlichen Fundierung des sportlichen Trainings. Das erklärte Ziel stellt die zielgerichtete und planmäßige Manipulation der sportlichen Leistungsfähigkeit auf der Basis von evidenzbasierten Trainingsempfehlungen dar. Zur Realisation dieses Ziels sind Kenntnisse über die Struktur der sportlichen Leistung unabdingbar (Hohmann et al., 2020).

Die trainingswissenschaftliche Leistungsdiagnostik verfolgt die Aufgabe der Strukturierung der sportlichen Leistung und Leistungsfähigkeit. Dabei werden Leistungsstrukturmodelle erstellt, die die sportliche Leistungsfähigkeit, unter Einbeziehung von Leistungsvoraussetzungen sowie wesentlicher Leistungskomponenten, modellieren (Hohmann et al., 2020).

¹ Da langfristig eigene Medallensätze für jede der 3 Einzeldisziplinen (Speed, Bouldern & Lead) angestrebt werden und somit von einem Wegfall des kombinierten Formats auszugehen ist, bezieht sich diese Arbeit ausschließlich auf die Einzeldisziplinen.

Das theoretische Vorgehen bei der Erstellung von Leistungsstrukturmodellen untergliedert sich in mehrere Schritte und bildet das Grundgerüst dieser Arbeit.

Um dem Vorgehen Rechnung zu tragen, dessen erster Schritt in der Hierarchisierung und Modellbildung besteht, befasst sich der erste Teil dieser Arbeit mit der Strukturierung sportlicher Leistungen.

Der zweite Schritt des theoretischen Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen besteht in der Bestimmung und der anschließenden Priorisierung leistungsrelevanter Merkmale. Zur Selektion der logisch leistungsrelevanten Merkmale aus denen der hypothetisch leistungsrelevanten, sind Kenntnisse über das Belastungsprofil der Wettkämpfe erforderlich. Dementsprechend setzt sich der zweite Teil dieser Arbeit mit dem Belastungsprofil im Wettkampfklettern auseinander.

Als abschließender Schritt des theoretischen Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen sind aus den logisch leistungsrelevanten Merkmalen die empirisch-statistisch leistungsrelevanten Merkmale zu extrahieren und die interne Ordnung dieser Merkmale innerhalb des Leistungsstrukturmodells zu bestimmen. Der dritte Teil dieser Arbeit befasst sich daher unmittelbar mit der Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern.

Der vierte Teil dieser Arbeit stellt eine übergreifende Diskussion der eigenen Forschungsergebnisse dar.

2 Strukturierung sportlicher Leistungen

Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Strukturierung sportlicher Leistungen.

Hierbei werden zunächst grundlegende Modellvorstellungen zur Struktur der sportlichen Leistung beschrieben, bevor in dem Fachartikel *Leistungsstruktur-analyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns* das theoretische Vorgehen bei der Erstellung von Leistungsstrukturanalysen und dessen praktische Umsetzung dargestellt sind.

2.1 Modellvorstellung zur Struktur sportlicher Leistungen

In folgendem Kapitel werden grundlegende Modellvorstellungen zur Struktur sportlicher Leistung beschrieben. Nach Hohmann et al. (2020) sind zwischen heuristischen Modellen, Leistungsstrukturmodellen mit empirischer Prüfung sowie integrativen Modellen der sportlichen Leistung zu unterscheiden.

2.1.1 Heuristische Modelle

Heuristische Modelle beschränken sich darauf, die für die sportliche Leistung relevant betrachteten Komponenten zu benennen. Werden Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten dargestellt, so erfolgt dies ohne eine Quantifizierung bezüglich Richtung und Größe vorzunehmen (Hohmann et al., 2020).

Zu den prominentesten Modellen dieser Kategorie zählt das Modell nach Bauersfeld und Schröter (1979), bei dem die Einflussgrößen Psychische Eigenschaften, Materielle-technische Bedingungen, Wettkampfbedingungen, Konstitution, Taktik, Koordination/Technik und Kondition um die sportliche Höchstleistung angeordnet sind und nur die letzten drei genannten Einflussfaktoren eine Beziehung untereinander aufweisen. Eine Abwandlung des Modells von Ehlenz, Grosser und Zimmermann (1986) listet Technik (unterteilt in koordinative Fähigkeiten und Bewegungsfertigkeiten), Taktisch-kognitive Fähigkeiten, Äußere (Umwelt-) Rahmenbedingungen, Kondition (unterteilt in Kraft, Ausdauer, Schnelligkeit und Beweglichkeit), Innere (personale) Rahmenbedingungen sowie Psychische Fähigkeiten als Einflussfaktoren auf, die jeweils untereinander sowie mit der sportlichen Leistung interagieren. Ein ähnliches Modell präsentieren Grosser, Starischka & Zimmermann (2004). Hier wird zwischen dem Leistungsvollzugszentrum, spezifiziert als kognitiv-psychische und neuro-physiologisch-energetische Steuerungs- und Regelungsprozesse, und den, sich in einem äußeren Ring darum befindenden, sportwissenschaftlich-praktischen Leistungskomponenten differenziert. Die Leistungskomponenten Koordinative Fähigkeiten & Bewegungstechniken, Umweltbedingungen, Rahmenbedingungen, Konditionelle Fähigkeiten, Individuell-persönliche Gegebenheiten sowie Strategie und Taktik sind unterscheidbar aber nicht

eindeutig abgrenzbar und stehen darüber hinaus miteinander in Verbindung (Schmidt, 2005).

Bei dem Modell der Leistungsstruktur nach Martin (1980) hingegen steht nicht alleinig die sportliche Leistung, sondern die Interaktion zwischen Leistungsstatus und Sportlerpersönlichkeit im Zentrum, um zu betonen, „[...] dass ein sportlicher Leistungsstatus immer als Ergebnis des Handelns der Gesamtpersönlichkeit aufzufassen ist“ (Hohmann et al., 2020, S. 44). Die Einflussfaktoren Kondition, Psyche, Intelligenz und Koordination sind kreisförmig um das Zentrum angeordnet und stehen durch Beziehungspfeile mit ihren jeweiligen Nachbarkonstrukten in Verbindung. Lediglich die Einflussfaktoren Psyche und Koordination weisen eine Verbindung zum Leistungsstatus sowie zur Sportlerpersönlichkeit auf.

Eine differenziertere Modellierung der sportlichen Leistung zeigt das Modell von Gundlach (1980, mod. von Schnabel, Harre & Borde, 1994) auf, das sich horizontal in die hierarchisch aufeinander aufbauenden, aber wechselwirkenden Vollzugsebenen mechanische Strukturen des Körpers, Mechanismen der Energiebereitstellung, Bewegungsregulation und Handlungsregulation untergliedert. Ebenenimmanent werden für jede Vollzugsebene Leistungsvoraussetzungen und Leistungsvollzüge aufgezeigt.

2.1.2 Leistungsstrukturmodelle mit empirischer Prüfung

Leistungsstrukturmodelle mit empirischer Prüfung hingegen modellieren datenzentriert den Zusammenhang zwischen Einflussgröße und Kriterium (Hohmann et al., 2020).

Als Beispiel für derartige Modelle ist zum einen das Deduktionskettenmodell zu nennen. Hierbei werden für eine sportliche Zielgröße Einflussgrößen benannt, die mit dieser einen deterministischen oder statistischen Zusammenhang aufweisen, bevor dieses Vorgehen gegebenenfalls auf der nächsten Modellebene repliziert wird, sodass die vorherigen Einflussgrößen als neue Zielgrößen fungieren. Kritisiert wird an diesen Modellen, dass die Abhängigkeiten der Ziel- und Einflussgrößen der unteren Modellebenen untereinander nicht erfasst

werden, lediglich der direkte bivariate Zusammenhang zwischen Einfluss- und Zielgröße wird modelliert (Hohmann et al., 2020).

Zum anderen zählen Pyramidenmodelle zu dieser Kategorie, die eine Strukturierung der sportlichen Leistung durch eine Hierarchisierung ihrer Komponenten in Ebenen vornehmen. Die primäre Untergliederung besteht in der Differenzierung zwischen dem Wettkampferhalten mit der an der Spitze stehenden Wettkampfleistung und der sportlichen Leistungsfähigkeit inklusive deren Leistungsvoraussetzungen, wobei weitere Untergliederungen vorgenommen werden können. Als Kriterien für die Ebeneneinteilung nennen Hohmann et al. (2020) das Wirksamwerden der unteren Ebenenmerkmale über die oberen Ebenenmerkmale, die Unumkehrbarkeit der Ebenenbeziehungen sowie einen abnehmenden Komplexitätsgrad der Ebenenmerkmale. Zur Quantifizierung der Ebenenmerkmale werden unterschiedliche Mess- und Beobachtungsverfahren eingesetzt, deren Selektion auf Basis des Erkenntnisinteresses sowie der sportartspezifischen Rahmenbedingungen vorgenommen wird. Die Modellierung der Leistungsstruktur auf Basis dieser Daten erfolgt ebenenimmanent durch die Identifikation zusammenhängender Merkmalsgruppen (z.B. mittels Faktoranalysen) und ebenenübergreifend durch die Analyse der Beziehungen zwischen den Ebenen (z.B. über Regressionsanalysen) (Hohmann et al., 2020).

2.1.3 Integratives Modell der sportlichen Leistung

Das integrative Modell der sportlichen Leistung (in Anlehnung an Glazier, 2007 und Mc Morris, 2009) hat zum Ziel, die Multifaktorialität der sportlichen Leistung zu verdeutlichen, die aus einem Selbstorganisationsprozess auf Basis der Interaktion personeller, aufgaben- und umweltspezifischer Bedingungen resultiert. Damit greift das Modell die Kritikpunkte an den vorherigen Modellen auf, die Zusammenhänge zwischen sportlicher Leistung und ihren Komponenten nicht entsprechend ihrer Komplexität zu modellieren, wobei generalisierte Modelle die Individualität und Spezifität der Wechselbeziehungen und damit einhergehend die Leistungsrelevanz einzelner Komponenten nicht valide reproduzieren würden. Die Zielstellung des integrativen Modells besteht demzufolge nicht in der Entwicklung von generalisierbaren Leistungsstruktur-

modellen, sondern als übergreifendes Konzept, in welches bestehende Strukturmodelle integriert und durch den Fokus auf die Analyse der komplexen Wechselbeziehungen datenzentriert spezifiziert werden können (Hohmann et al., 2020).

2.2 Fachartikel

2.2.1 *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns*

Autoren Prof.in Dr. Claudia Augste, Marvin Winkler & Prof. Dr. Stefan Künzell

Publikationsstatus Veröffentlicht am 24.05.2022 im German Journal of Exercise and Sport Research

DOI <https://doi.org/10.1007/s12662-022-00828-9>

3 Belastungsprofil des Wettkampfkletterns

Die Wettkampfdiagnostik liefert im Sinne der statusbezogenen Sportartanalyse wichtige Informationen, die zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen herangezogen werden können. Demnach sind, im Rahmen des von Hohmann et al. (2020) formulierten Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen, Kenntnisse über das Belastungsprofil der Wettkämpfe erforderlich, um die Leistungsrelevanz hypothetischer Merkmale logisch zu begründen. Das Belastungsprofil enthält sowohl Kennziffern der inneren Wettkampfbelastung, die Aufschluss über die individuelle Belastungs-Beanspruchungs-Reaktion der Athleten² geben, als auch der äußeren Wettkampfbelastung, die die allgemeine Struktur der Wettkampfbelastung beschreiben (Hohmann et al., 2020).

In den nachfolgenden Unterkapiteln des zweiten Teils dieser Arbeit ist disziplinspezifisch zunächst der Forschungsstand³ zum Belastungsprofil im Wettkampfklettern zusammengefasst und das in diesem Bereich bestehende Forschungsdesiderat konkludiert. In eigenen Forschungsarbeiten wurden zum Belastungsprofil des Wettkampfkletterns drei Untersuchungen durchgeführt und in den zugehörigen Fachartikeln publiziert: Eine Analyse der quantitativen äußeren Wettkampfbelastung von internationalen Kletterwettkämpfen (siehe Fachartikel *The Load Structure in International Competitive Climbing*) sowie zwei Studien zu internationalen Boulderwettkämpfen: Zum einen zur Häufigkeitsverteilung von Boulderkategorien und der Erfolgsrate der AthletInnen bezüglich dieser (siehe Fachartikel *Athletes' performance in different boulder types at international bouldering competitions*) sowie zum anderen zur Erfolgswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit einer Änderung des Lösungsansatzes nach einem Fehlversuch (siehe Fachartikel *Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering*).

² Für eine bessere Lesbarkeit wird als geschlechtsneutrale Formulierung das generische Maskulinum verwendet.

³ Bezogen auf den Zeitraum der Konzeption des Studiendesigns des Fachartikels *The Load Structure in International Competitive Climbing* (2018).

3.1 Belastungsprofil des Speedkletterns

3.1.1 Beschreibung der Disziplin

Beim Speedklettern treten zwei Athleten auf identischen, international standardisierten Routen gegeneinander an. Die Zeit für die Bewältigung der Route wird als Bewertungskriterium herangezogen und als zeitliche Differenz zwischen dem Ertönen des Startsignals und dem Abschlagen des Top-Pads des Zeitmesssystems gemessen. Der Wettkampf wird in 2 Runden ausgetragen, einer Qualifikationsrunde und einer Finalrunde. Die Qualifikationsrunde besteht aus 2 Races, wobei die schnellere der beiden Zeiten für die Qualifikation der Finalrunde herangezogen wird. Die Finalrunde besteht aus 2 bis 4 Eliminierungsphasen, dessen genaue Anzahl von der Anzahl der Wettkampfteilnehmer abhängig ist. Zwischen jedem Versuch steht den Athleten i.d.R. eine Erholungsphase von mindestens 5 Minuten zu (International Federation of Sport Climbing, 2018).

3.1.2 Forschungsstand

Das Speedklettern zeichnet sich durch kurze, hochintensive Belastungen aus.

Die Belastungszeit entsprechend des aktuellen Weltrekords für die 15 m Normspeedroute beträgt 6,53 s für Frauen und 5,00 s für Männer (International Federation of Sports Climbing, 2022). Die einzige bekannte Studie zum Belastungsprofil im Speedklettern von Fuss und Niegl (2006) untersuchte kinematische und kinetische Parameter mittels an Klettergriffen montierten Kraftsensoren. Die Kraft-Zeitverläufe zeigten einen charakteristischen Verlauf bestehend aus einer initialen Kraftspitze gefolgt von einem steilen Kraftanstieg mit zwei aufeinanderfolgenden Maxima. Korrelationen mit der Klettergeschwindigkeit bzw. dem Leistungsniveau ergaben sich für Kontaktzeiten, Höhe der initialen Kraftspitze sowie der aufs Körpergewicht normierten mittleren und maximalen Kräfte in vertikaler Richtung.

3.1.3 Konkludierung des Forschungsdesiderats

Der bisherige Forschungsstand zum Belastungsprofil im Speedklettern ist defizitär: Es existieren weder Studien zur äußeren noch zur inneren Belastungsstruktur von Wettkämpfen an der heutzutage ausschließlich verwendeten Normroute.

Für die eigenen Forschungsarbeiten war es unabdingbar, dass die Messinstrumente zur Analyse des Belastungsprofils bei Wettkämpfen, im Speedklettern wie auch in den anderen Disziplinen, rückwirkungsfrei sein mussten. In eigenen Forschungsarbeiten wurde daher die äußere Belastungsstruktur von internationalen Speedkletterwettkämpfen untersucht (siehe Fachartikel *The Load Structure in International Competitive Climbing*).

3.2 Belastungsprofil des Boulderns

3.2.1 Beschreibung der Disziplin

Beim Bouldern müssen kurze Klettereien (Boulder) in Absprunghöhe geklettert werden. Die Wertung basiert in erster Linie auf der Anzahl der getoppten Boulder, gefolgt von den erreichten Bonusgriffen und der geringsten Anzahl von Versuchen, die zum Erreichen der Top- bzw. Bonusgriffe erforderlich sind. Die Boulderwettkämpfe bestehen aus 3 Runden mit unterschiedlichen Modi: In der Qualifikations- und Halbfinalrunde muss ein Parcours aus 5 bzw. 4 Bouldern innerhalb einer festen Zeitspanne von 5 min pro Boulder geklettert werden, welche auch der Pausenzeit zwischen den Bouldern entspricht. Im Gegensatz dazu wird in der Finalrunde jeder der 4 Boulder von allen Teilnehmern versucht, bevor sie als Gruppe zum nächsten Boulder weitergehen. Die Kletterzeit ist auf 4 min begrenzt. Eine kollektive Beobachtungszeit von 2 min pro Boulder geht der Finalrunde voraus, nicht aber der Qualifikations- und Halbfinalrunde (International Federation of Sport Climbing, 2018).

3.2.2 Forschungsstand

Das Belastungsprofil im Bouldern ist durch eine intermittierende Belastungsstruktur gekennzeichnet. Innerhalb des vorgegebenen Zeitintervalls von 4 bzw. 5 min versuchten die Athleten ein Boulderproblem im Durchschnitt 2,8 bis 5,1 Mal, wobei die mittlere Dauer eines Versuches zwischen 15,2 und 29,8 s variierte und die anschließende Pausendauer vor dem Beginn des nächsten Versuches zwischen 27,2 s und 114,5 s betrug (Medernach et al., 2016; White & Olsen, 2010). Die Gesamtkletterzeit pro Boulder addierte sich zu einer Dauer von 63,9 s bis 92 s und stand damit im Verhältnis 1:3,8 zur Gesamtpausenzeit pro Boulder (La Torre et al., 2009; Medernach et al., 2016; White & Olsen, 2010). Die Herzfrequenz (HF) stieg über die Anzahl der Versuche hinweg an, sodass sie in 12 % der Zeit im HF-Bereich 86 – 100 % des altersmäßig geschätzten Maximums lag und Spitzenwerte von 93 % erreichte. Die Laktatwerte betrugen nach dem letzten Versuch der jeweiligen Rotationsperiode $5,6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, wobei Versuche von länger als 20 s zu einem erhöhten Anstieg

führten. Die Pause zwischen 5 oder 6 zu kletternden Bouldern betrug analog 5 oder 6 min.

3.2.3 Konkludierung des Forschungsdesiderats

Die Erkenntnisse bisheriger Studien sind nicht repräsentativ für das Belastungsprofil heutiger Boulderwettkämpfe: Gründe hierfür sind Änderungen im Regelwerk bezüglich der Anzahl und der Pausenzeit zwischen den Bouldern im Vergleich zu den Studien von La Torre et al. (2009) und White und Olsen (2010), der Studieneinschluss ausschließlich männlicher Athleten (White & Olsen, 2010), die geringe Stichprobengröße von nur jeweils 3 analysierten Bouldern (Medernach et al., 2016), die ausschließliche Analyse von Modi, die dem heutigen Qualifikations- und Halbfinalmodus ähneln sowie sich aus der Weiterentwicklung des Sports ergebende Änderungen des Belastungsprofils.

Eigene Forschungsarbeiten beziehen sich, aufgrund der Bedingung der Rückwirkungsfreiheit der Messinstrumente, auf die Analyse der äußeren Belastungsstruktur. Hierzu wurden zwei Studien mit dem Ziel durchgeführt, die allgemeine Struktur der Wettkampfbelastung von internationalen Boulderwettkämpfen zu quantifizieren (siehe Fachartikel *The Load Structure in International Competitive Climbing* und *Athletes' performance in different boulder types at international bouldering competitions*) sowie eine weitere, um die Relevanz der taktischen Komponente des Strategiewechsels nach einem Fehlversuch empirisch zu bestimmen (siehe Fachartikel *Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering*).

3.3 Belastungsprofil des Leadkletterns

3.3.1 Beschreibung der Disziplin

Beim Leadklettern versuchen sich die Athleten an Routen an Wänden, die mindestens 15 m hoch sind. Dabei klettern die Athleten im Vorstieg (englisch: on lead), was bedeutet, dass sie das Sicherungsseil während des Kletterns in die vorhandenen Zwischensicherungen einhängen müssen, die im Falle eines Sturzes ein Abstürzen verhindern. Das Vorankommen entlang der Route ist das wichtigste Bewertungskriterium. Die zwei verschiedenen Modi, die während eines Vorstiegswettbewerbs angewendet werden, sind *Flash* (in der Qualifikationsrunde) und *Onsight* (OS) (in der Halbfinal- und Finalrunde). Beide Modi beziehen sich auf das erstmalige Versuchen einer Kletterroute, unterscheiden sich jedoch in der Menge der Routeninformationen, die den Athleten vor dem Klettern zur Verfügung stehen (International Federation of Sport Climbing, 2018): Während beim OS lediglich Informationen zur Verfügung stehen, die durch das Betrachten der Kletterroute vom Boden aus ersichtlich sind, dürfen beim Flash vor und während dem ersten eigenen Versuch jegliche Art von Informationen wie bspw. Videoaufnahmen anderer Athleten beim Versuchen der Kletterroute konsultiert werden.

3.3.2 Forschungsstand

Für das Leadklettern liegen sowohl Studien zur inneren wie auch zur äußeren Wettkampfbelastung vor, sodass das Belastungsprofil detailliert beschrieben werden kann.

Dieses ist, im Sinne der äußeren Wettkampfbelastung, durch durchschnittliche Kletterzeiten zwischen 5,9 bzw. 4,0 min für Frauen und 4,3 bzw. 3,7 min für Männer charakterisiert. Während eines Versuches machten Frauen im Durchschnitt 46,0 bzw. 36,4 und Männer 47,7 bzw. 42,3 Kletterzüge (Arbulu et al., 2015; Schädle-Schardt, 1998). Jeder Kletterzug besteht aus, unter dem Aspekt der Fingerbeugemuskulatur betrachtet, einer Belastungs- (Griff greifen und halten) und Entlastungsphase (Greifen zum nächsten Griff und Durchführung weiterer, nicht der unmittelbaren Fortbewegung dienende Aktionen ohne große

Krafteinsätze der Fingerbeugemuskulatur der entsprechenden Hand wie Schütteln, Chalken oder Klippen) (Winkler, 2016). Schädle-Schardt (1998) gibt die mittlere Dauer von Be- und Entlastungsphasen mit 9,0 s bzw. 2,4 s an, während Arbulu et al. (2015) Belastungszeiten von 8,5 s für Frauen und 7,0 s für Männer ermittelten und sich die Entlastungszeiten in Abhängigkeit des Geschlechts und der durchgeführten Aktionen unterschieden.

Bezüglich der inneren Wettkampfbelastung zeigen mehrere Studien, dass insbesondere die Oberkörpermuskulatur stark beansprucht wird (Baláš, Panáčková, Jandová et al., 2014; Deyhle et al., 2015; Gajewski et al., 2009; Noé et al., 2001; Watts et al., 1996).

Kardiorespiratorische und metabolische Beanspruchungsmerkmale wurden in einer Vielzahl von Studien untersucht und erwiesen sich abhängig von zahlreichen Faktoren (Giles et al., 2014; Giles & Brandenburg, 2016) wie der Wandbeschaffenheit hinsichtlich der Unterscheidung zwischen Treadwall und regulärer Kletterwand (Baláš, Gajdošík, Krupková et al., 2021), der Wandneigung (Baláš, Panáčková, Strejcová et al., 2014; Billat et al., 1995; de Geus et al., 2006; Fryer et al., 2011; Mermier et al., 1997; Watts & Drobish, 1998), dem Schwierigkeitsgrad und der Charakteristik der Kletterroute (Bertuzzi et al., 2007; Billat et al., 1995; de Geus et al., 2006; Mermier, 2000; Sheel et al., 2003), der Klettergeschwindigkeit (Booth et al., 1999; Rosponi et al., 2012), der Absicherung hinsichtlich der Unterscheidung zwischen Toprope- und Vorstiegsbegehungen (Aras & Akalan, 2014; Dickson et al., 2012; Draper et al., 2010; Fryer, Dickson, Draper, Blackwell et al., 2012; Zarattini et al., 2018), des Begehungsstils (Draper et al., 2008; Limonta et al., 2020) und dem Kletterniveau der Studienteilnehmer (Baláš, Gajdošík, Giles et al., 2021; Baláš, Panáčková, Jandová et al., 2014; Baláš, Panáčková, Strejcová et al., 2014; Bertuzzi et al., 2012; España-Romero et al., 2009; Fryer, Dickson, Draper, Eltom et al., 2012; Fryer et al., 2018). Im Folgenden wird das Belastungsprofil für die gebräuchlichsten Beanspruchungsmerkmale skizziert:

- Sauerstoffaufnahme (VO_2) während des Kletterns: "Average oxygen consumption during climbing ranges between 20 and 37 mL*kg⁻¹*min⁻¹ [...], corresponding to 40 - 70 per cent of treadmill VO_{2peak} and 75 per

cent of climbing VO_{2peak} [...]” (Giles & Brandenburg, 2016, S. 24). VO_{2peak} steht dabei als Abkürzung für die höchste gemessene VO_2 während des jeweiligen Tests. Die Sauerstoffaufnahme steigt zu Beginn des Kletterversuchs stark an und flacht in deren Verlauf ab (Dickson et al., 2012; Fryer, Dickson, Draper, Eltom et al., 2012; Watts et al., 2000). In der einzigen Studie, welche unter Berücksichtigung der Erkenntnisse bezüglich der genannten Einflussfaktoren auf die VO_2 , die Belastungsmerkmale unter wettkampfählichen Bedingungen (reguläre Kletterwände (Baláš, Gajdošík, Krupková et al., 2021), überhängende Routen mit einem hohen subjektiven Schwierigkeitsgrad (Baláš, Panáčková, Strejcová et al., 2014; Bertuzzi et al., 2007; Billat et al., 1995; de Geus et al., 2006; Mermier et al., 1997; Sheel et al., 2003; Watts & Drobish, 1998), Elitekletterer⁴ (Baláš, Panáčková, Strejcová et al., 2014; Bertuzzi et al., 2007)) gemessen hat, betrug die durchschnittliche Sauerstoffaufnahme (VO_{2avg}) $35,9 \pm 3,2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ und die VO_{2peak} $41,6 \pm 4,2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, was $69,6 \pm 7,3 \%$ bzw. $81,1 \pm 9,9 \%$ der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}) ($52,2 \pm 5,1 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) des Laufband-Stufentests entsprach (de Geus et al., 2006).

- Herzfrequenz: Die HF steigt während des Kletterns, im Vergleich zur VO_2 überproportional an (20 - 40 % höher (Giles & Brandenburg, 2016)), sodass die Werte bis zu 91 % der mittels Laufband gemessenen maximalen Herzfrequenz (HF_{max}) betragen (Magalhães et al., 2007). Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse bezüglich der genannten Einflussfaktoren auf die HF (reguläre Kletterwände (Baláš, Gajdošík, Krupková et al., 2021), überhängende Routen mit einem hohen subjektiven Schwierigkeitsgrad (Baláš, Panáčková, Strejcová et al., 2014; Bertuzzi et al., 2007; Billat et al., 1995; de Geus et al., 2006; Mermier et al., 1997; Sheel et al., 2003; Watts & Drobish, 1998), Elitekletterer⁴ (Baláš, Panáčková, Strejcová et al., 2014; Bertuzzi et al., 2007)) betrug die

⁴ Bezogen auf die Klassifikation von Draper et al. (2015). In einigen Studien wurden die Studienteilnehmer als „Elitekletterer“ bezeichnet, basierend auf deren Kletterniveau sind diese nach der Klassifikation von Draper et al. (2015) jedoch hauptsächlich in den darunter liegenden Leistungsklassen „intermediate“ bzw. „advanced“ zu verorten.

durchschnittliche HF (HF_{avg}) unter wettkampfähnlichen Bedingungen $168,7 \pm 8,0$ bpm und die HF_{max} $175,1 \pm 13,9$ bpm, was $88,2 \pm 7,1$ % bzw. $91,2 \pm 5,5$ % der Hf_{max} (192 ± 13 bpm) des Laufband-Stufentests entsprach (de Geus et al., 2006).

- **Laktatkonzentration:** Die im Anschluss an den Kletterversuch gemessene Laktatkonzentrationen (LA_{post}^-) variierten zwischen 1,6 und 11,1 $mmol \cdot L^{-1}$ (Giles & Brandenburg, 2016). Die große Varianz ergibt sich durch den Einfluss zahlreicher Einflussfaktoren. In der einzigen Studie, welche unter Berücksichtigung dieser die LA_{post}^- unter wettkampfähnlichen Bedingungen (hohe subjektive Schwierigkeit (de Geus et al., 2006; Fryer et al., 2011; Mermier et al., 1997; Watts & Drobish, 1998), Durchführung bis Belastungsabbruch (Booth et al., 1999; España-Romero et al., 2009; Gajewski et al., 2009; Magalhães et al., 2007; Sherk et al., 2011), Elitekletterer⁴ (Bertuzzi et al., 2007; España-Romero et al., 2009; Gáspari et al., 2015)) gemessen wurde, betrug die LA_{post}^- nach der Halbfinalroute $5,6 \pm 1,1$ $mmol \cdot L^{-1}$ und nach der Finalroute $7,0 \pm 1,1$ $mmol \cdot L^{-1}$ (Gáspari et al., 2015).
- **Energiebereitstellung:** In der dem Wettkampfklettern ähnlichsten Bedingung (Elitekletterer, schwere Route) erfolgte die Energiebereitstellung aus einer Kombination aus aeroben (41,9 %), anaerob-laktaziden (35,8 %) und anaerob-alaktaziden Mechanismen der Energiebereitstellung (22,3 %) (Bertuzzi et al., 2007).
- **Sauerstoffsättigung in der Fingerbeugemuskulatur:** Mit zunehmender Intensität steigt der Sauerstoffverbrauch in der Fingerbeugemuskulatur an. Die kurzen Phasen der Reperfusion sind für eine vollständige Oxygenierung nicht mehr ausreichend, sodass der Sauerstoffverbrauch die Sauerstoffaufnahme übersteigt, welches zu einem Anstieg der Deoxyhämoglobin (HHb)-konzentration führt (bezeichnet als muscle oxygen breakpoint (MOB)) (Baláš, Gajdošík, Giles et al., 2021). Infolgedessen nimmt der Sauerstoffsättigungsindex (TSI) ab, der sich aus dem Quotienten zwischen Oxyhämoglobin (O_2Hb) und der Summe aus O_2Hb und HHb berechnet. In inkrementellen Stufentests nahm die Sauerstoffsättigung des m. flexor digitorum profundus (FDP) um 10 - 15 % ab (Baláš,

Gajdošík, Giles et al., 2021) und erklärte 32 % der Rotpunkt (RP) Kletterleistung (Fryer et al., 2018).

3.3.3 Konkludierung des Forschungsdesiderats

Die zahlreichen Studien ergeben zusammengenommen ein umfassendes Bild über das Belastungsprofil im Leadklettern, dennoch ist dieses hinsichtlich der inneren Wettkampfbelastung dahingehend limitiert, dass die meisten der bisherigen Studien unter wettkampfähnlichen Bedingungen, jedoch nicht im Rahmen von realen Kletterwettkämpfen durchgeführt wurden und das Kletterniveau der Probanden trotz deren Klassifikation als Elitekletterer (Draper et al., 2015) im Vergleich zu dem in internationalen Kletterwettkämpfen geforderten Niveau deutlich geringer ausfällt.

Bezüglich der äußeren Wettkampfbelastung sind die bisherigen Studien aufgrund mehrerer Regeländerungen sowie der Weiterentwicklung des Sports nicht repräsentativ: Das Belastungsprofil des heutzutage in der Qualifikationsrunde verwendeten Flash-Modus wurde bisher in keiner Studie analysiert und in der Halbfinal- und Finalrunde ist die Kletterzeit auf 6 min restringiert, während in den anderen Studien längere Kletterzeiten zulässig waren (Arbulu et al., 2015; International Federation of Sport Climbing, 2018; Schädle-Schardt, 1998).

In eigenen Forschungsarbeiten wurde bezüglich der äußeren Belastungsstruktur eine Studie mit dem Ziel durchgeführt, die allgemeine Struktur der Wettkampfbelastung von internationalen Leadwettkämpfen zu quantifizieren (siehe Fachartikel *The Load Structure in International Competitive Climbing*).

3.4 Fachartikel

3.4.1 *The Load Structure in International Competitive Climbing*

Autoren Marvin Winkler, Prof. Dr. Stefan Künzell & Prof.in Dr. Claudia Augste

Publikationsstatus Veröffentlicht am 22.03.2022 in Frontiers in Sport and Active Living

DOI <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.790336>

3.4.2 *Athletes' performance in different boulder types at international bouldering competitions*

Autoren Prof.in Dr. Claudia Augste, Paulin Sponar & Marvin Winkler

Publikationsstatus Veröffentlicht am 02.04.2021 im International Journal of Performance Analysis in Sport

DOI <https://doi.org/10.1080/24748668.2021.1907728>

3.4.3 *Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering*

Autoren Prof. Dr. Stefan Künzell, Johannes Thomiczek, Marvin Winkler & Prof.in Dr. Claudia Augste

Publikationsstatus Veröffentlicht am 09.10.2020 im German Journal of Exercise and Sport Research

DOI <https://doi.org/10.1007/s12662-020-00680-9>

4 Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern

In den ersten beiden Teilen dieser Arbeit wurde, analog zu dem theoretischen Vorgehen zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen, die Strukturierung sportlicher Leistungen sowie das Belastungsprofil des Wettkampfkletterns thematisiert. Der dritte Teil dieser Arbeit befasst sich nun unmittelbar mit der Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern.

Als Basis für die eigenen Untersuchungen ist in den ersten Unterkapiteln zunächst der aktuelle Forschungsstand⁵ zur Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern disziplinspezifisch dargestellt und der daraus resultierende Forschungsbedarf abgeleitet. In der weiteren Untergliederung des jeweiligen Forschungsstands ist zu Beginn die aktuelle Evidenz bezüglich des Einflusses der einzelnen Komponenten der sportlichen Leistung, in Anlehnung an das heuristische Modell der Struktur sportlicher Leistungen von Ehlenz, Grosser und Zimmermann (1986) dargestellt⁶. Anschließend ist die Studienlage hinsichtlich multivariater Modelle, aus denen sich bereits Erkenntnisse hinsichtlich der Leistungsstruktur ableiten lassen, zusammengefasst. In eigenen Forschungsarbeiten wurden disziplin- und geschlechtsspezifische Leistungsstrukturmodelle für das Wettkampfklettern erstellt (siehe Fachartikel *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering, and Lead Climbing*), ein Test zur Diagnose der intermittierenden Fingerkraftausdauer bezüglich zulässiger Kraft- und Zeitabweichungen optimiert (siehe Fachartikel *Optimization of an intermittent finger endurance test for climbers regarding gender and deviation in force and pulling time*) und mittels Nah-Infrarotspektroskopie erfasste Parameter bezüglich ihres Vorhersagewertes auf die intermittierende Fingerkraftausdauer und die Leistung in einem simulierten Leadkletterwettkampf analysiert (siehe

⁵ Bezogen auf den Zeitraum der Konzeption des Studiendesigns des Artikels *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering and Lead Climbing* (2018). Publikationen neueren Datums sind in der abschließenden Diskussion integriert.

⁶ Es sind lediglich diejenigen Komponenten aufgeführt, dessen Forschungsstand basierend auf mindestens einer entsprechenden Publikation zusammengefasst werden kann

Fachartikel *Predictive value of forearm muscle oxygenation parameters for intermittent finger endurance and competitive climbing performance*).

4.1 Leistungsdiagnostik im Speedklettern

4.1.1 Forschungsstand zum Einfluss der einzelnen Komponenten

4.1.1.1 Innere Rahmenbedingungen

Der Einfluss anthropometrischer Parameter auf die Leistung im Speedklettern ist divergent zwischen Frauen und Männern: In der Studie von Krawczyk et al. (2018) bestand eine signifikante, positive Korrelation zwischen der Kletterzeit ($9,60 \pm 1,83$ s) von 5 Spitzenkletterinnen und der Körpergröße (BH) ($r = ,94$), dem Körpergewicht (BM) ($r = ,96$) und der fettfreien Körpermasse (LBM) ($r = ,98$), nicht jedoch dem Körperfettanteil (BF%), dem Body mass index (BMI) und dem Ponderal index (PI). In einer ähnlichen Studie mit 6 männlichen Spitzenkletterern konnten Ozimek et al. (2018) keine signifikante Korrelation zwischen der bei einem Weltcup erzielten Bestzeit ($6,05 \pm 0,22$ s) und der BH, dem BM, dem BMI, dem PI und dem Rohrer's Index (RI) feststellen. Zudem ergaben sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der analysierten anthropometrischen Parameter BH, BM, BMI, BF% und der Länge der oberen Extremitäten zwischen nationalen Spitzenkletterern und Freizeitkletterern (Krawczyk & Ozimek, 2014).

4.1.1.2 Technik

In zwei Studien wurde der Einfluss von koordinativen Fähigkeiten bzw. Bewegungsfertigkeiten auf die Leistung im Speedklettern untersucht: Das Ranking von 11 weiblichen Kletterinnen bei einem Jugendweltcup korrelierte signifikant ($r = ,73$) mit einem der Gleichgewichtstests (crosswise standing on a balance bench test (CSBB)). Die beiden anderen Gleichgewichtstests sowie die 3 allgemeinen Koordinationstests wiesen hingegen keine signifikante Korrelation mit dem Ranking auf (Ignjatović et al., 2016; Stanković et al., 2017).

4.1.1.3 Kondition

Krawczyk et al. (2018) stellten keine signifikante Korrelation zwischen der Kletterzeit von 5 Spitzenkletterinnen und der Sprunghöhe (Counter movement jump (CMJ), mit und ohne Armeinsatz) bzw. der daraus berechneten Leistung (absolut sowie relativ zum BM und zur LBM)) fest. Bei den 6 männlichen

Spitzenathleten bestand eine sehr hohe Korrelation ($r = ,98$) zwischen der Bestzeit und der mittels der Magaria-Kalamen Formel berechneten Leistung beim Speedklettern relativ zum BM (Ozimek et al., 2018). Des Weiteren unterschieden sich Freizeit- und Spitzenkletterer signifikant hinsichtlich der Anzahl an Situps innerhalb von 30 s, der Sprungweite eines Standweitsprungs, der maximalen anaeroben Leistungsfähigkeit und der Zeit in einem ZigZag-Lauf. Keine signifikanten Unterschiede fanden sich hingegen für die Handgriffkraft, die Beweglichkeit und die Frequenz in einem Tapping Test (Krawczyk & Ozimek, 2014).

4.1.2 Forschungsstand zu multivariaten Modellen

Die einzigen beiden multivariaten Studien evaluierten den Einfluss allgemeiner Koordinations- bzw. Gleichgewichtstests auf die Speedkletterleistung in einem Jugendweltcup, die jedoch durch diese nicht signifikant vorhergesagt werden konnte (Ignjatović et al., 2016; Stanković et al., 2017).

4.1.3 Konkludierung des Forschungsdesiderats

Aus den oben zusammengefassten Erkenntnissen leitet sich bezüglich eigener Forschungsarbeiten folgendes Forschungsdesiderat ab:

Die bisherigen Studien fokussieren sich auf die Analyse des Einflusses einzelner anthropometrischer, technischer und konditioneller Variablen auf die Leistung im Speedklettern (Zeit oder Ranking). Aus einer Analyse des Belastungsprofils sowie aus Interviews mit Leistungstrainern (Augste & Künzell, 2017) können jedoch weitere logisch leistungsrelevante Merkmale extrahiert werden, deren Einfluss auf die Kletterleistung empirisch zu überprüfen ist. Des Weiteren beziehen sich die vorhandenen Erkenntnisse ausschließlich auf die Untersuchung kleiner Stichprobengrößen von Spitzenkletterern, eine Generalisierung bzw. Diversifizierung hinsichtlich eines breiteren Leistungsspektrums bedarf weiterer Studien mit einem größeren Stichprobenumfang. Zudem weisen die bisherigen Ergebnisse darauf hin, dass die Leistungsstruktur von Frauen und Männern unterschiedlich sein könnte.

Um das konkludierte Forschungsdesiderat zu adressieren, wurde in eigene Forschungsarbeiten geschlechtsspezifische Leistungsstrukturmodelle für das Speedklettern, basierend auf zahlreichen logisch leistungsrelevanten Merkmalen und einem größeren Stichprobenumfang mit heterogenem Leistungsniveau, erstellt (siehe Fachartikel *Competitive Performance Predictors for Speed Climbing, Bouldering and Lead Climbing*).

4.2 Leistungsdiagnostik im Bouldern

4.2.1 Forschungsstand zum Einfluss der einzelnen Komponenten

4.2.1.1 Innere Rahmenbedingungen

Zahlreiche Studien haben anthropometrische Merkmale hinsichtlich der Differenzierung zwischen Boulderern (BC) und Nicht-Boulderern (NC) bzw. zwischen verschiedenen Leistungsniveaus oder hinsichtlich der Korrelation mit der Boulderleistung untersucht:

- Die BH unterscheidet sich nicht zwischen BC und NC, zwischen BC verschiedener Leistungsniveaus, sowie zwischen BC und Leadkletterern (LC) (Fanchini et al., 2013; Fryer et al., 2017; Macias et al., 2015; Ozimek, Krawczyk et al., 2017; Wall et al., 2004). Eine Ausnahme bildet die Studie von Mladenov et al. (2009), die eine signifikante Korrelation ($r = ,49$) zwischen der BH und dem Ranking in einem Boulderweltcup festgestellt haben. In der Studie von Ozimek, Krawczyk et al. (2017) korrelierte die BH hingegen nicht signifikant ($r = ,01$) mit dem Ranking auf nationaler Ebene.
- Das BM der BC ist niedriger als das von sportlich aktiven NC und ähnelt dem von untrainierten NC, es unterscheidet sich nicht zwischen verschiedenen Leistungsniveaus und korreliert nicht signifikant mit der Kletterleistung (Fanchini et al., 2013; Macias et al., 2015; Mladenov et al., 2009; Ozimek, Krawczyk, et al., 2017; Wall et al., 2004).
- Der BMI unterscheidet sich nicht signifikant zwischen BC und untrainierten NC und korrelierte nicht signifikant mit der Kletterleistung (Mladenov et al., 2009; Ozimek, Krawczyk et al., 2017).
- Der BF% und die LBM der BC sind ähnlich der von sportlich aktiven NC und der BF% geringer als der von untrainierten NC. BF% und LBM unterscheiden sich nicht signifikant zwischen BC verschiedener Leistungsniveaus (Macdonald & Callender, 2011; Macias et al., 2015; Ozimek, Krawczyk et al., 2017; Wall et al., 2004). In der Studie von Ozimek, Krawczyk et al. (2017) korrelierte der BF% signifikant mit dem Ranking ($r = -,81$), in der Studie von Mladenov et al. (2009) hingegen bestand

kein signifikanter Zusammenhang zwischen Ranking und BF% sowie der Muskelmasse (MM).

- Die Armspannweite und der Armlängen-zu-Körpergrößenindex ist höher bei BC als bei NC, die Armlänge und der Armlängen-zu-Körpergrößenindex korrelieren ($r = ,77$ bzw. $r = ,80$) mit dem Wettkampfranking (Ozimek, Krawczyk, et al., 2017).
- Der Unterarmumfang ist bei BC höher als bei NC, keine signifikanten Unterschiede bestehen hingegen für das Unterarmvolumen (Fryer et al., 2017; Sveen et al., 2016).

Neben dem beschriebenen Einfluss der anthropometrischen Merkmale haben BC eine im Vergleich zu NC und LC signifikant höhere prozentuale Verteilung des RR Genotypes sowie des R-Allels des Alpha-Actinin-3 (ACTN3)-Gens, welches eine genetische Prädisposition für den Erfolg in Schnelligkeits- und Schnellkraftsportarten darstellt (Ginszt et al., 2018).

4.2.1.2 Technik

Aus den von Ignjatović et al. (2016) verwendeten Gleichgewichtstest wies ausschließlich der Flamingo Test eine signifikante Korrelation ($r = ,67$) mit der Leistung bei einem Jugendweltcup im Bouldern auf, während hingegen keiner der von Stanković et al. (2017) verwendeten allgemeinen Koordinationstests signifikant damit korrelierte.

4.2.1.3 Kondition

Der Forschungsstand ist, hinsichtlich Ausdifferenziertheit und Einfluss der Kondition auf die Leistung im Bouldern, abhängig von den untersuchten Merkmalen:

- Die Studienlage zur Fingermaximalkraft ist am umfangreichsten und zeichnet ein einheitliches Bild: Die absolute und in Relation zum BM gemessene Fingermaximalkraft differenziert zwischen BC und NC sowie zwischen BC unterschiedlicher Leistungsniveaus und korreliert signifikant mit der Boulderleistung (Fanchini et al., 2013; Fryer et al., 2017; Macdonald & Callender, 2011; Macias et al., 2015; Michailov et al., 2018;

Sveen et al., 2016; Wall et al., 2004). Die relative Fingermaximalkraft korreliert dabei stärker mit der Boulderleistung als die absolute Fingermaximalkraft (Michailov et al., 2018; Wall et al., 2004).

- Die Handgriffkraft stellt im Gegensatz zur Fingermaximalkraft eine unspezifischere Messung hinsichtlich der Boulder- und Kletterleistung dar (López-Rivera, 2014; Watts & Jensen, 2003; Watts et al., 2008). Absolut gemessen differenziert diese nicht zwischen BC und NC und korreliert nicht signifikant mit der Kletterleistung (Augustsson et al., 2018; Macdonald & Callender, 2011; Macias et al., 2015; Votava et al., 2018). Relativ zum BM gemessen weisen in der Studie von Macias et al. (2015) BC eine signifikant höhere Handgriffkraft auf als NC, während Macdonald and Callender (2011) keine signifikanten Unterschiede festgestellt haben.
- Die Oberkörpermaximalkraft in Form der Blockierkraft (relativ zum BM) bei einer 90 Grad Flexion im Articulatio cubiti differenziert zwischen BC unterschiedlicher Leistungsniveaus und korreliert signifikant sowohl mit der Leistung in einem simulierten Boulderwettkampf wie auch mit der selbst eingeschätzten Kletterfähigkeit (self-reported climbing ability (SRCA)) (Wall et al., 2004). Auch Augustsson et al. (2018) stellten eine signifikante Korrelation der SRCA mit der Maximalkraft der Ellenbogenflexion, -extension, -supination und -pronation fest.
- Die Kraft der unteren Extremitäten wurde mittels der erzielten Höhe bei einem einbeinigen dynamischen Aufstehen über einen hohen Tritt gemessen und differenzierte zwischen BC unterschiedlicher Leistungsniveaus und korrelierte signifikant mit der Boulderleistung ($r = ,67$) (Brent et al., 2009).
- Die Explosivkraft (RFD_{peak}) der Fingerbeugemuskulatur ist bei BC signifikant höher als bei NC und LC (Fanchini et al., 2013).
- Die Fingerkraftausdauer wurde mittels verschiedener Tests evaluiert: Bei einem kontinuierlichen Fingerkraftausdauerterst (60 % der Maximalkraft bei maximaler willkürlicher Kontraktion (MVC), 30 s) stellten Michailov et al. (2018) eine signifikante Korrelation der maximalen und durchschnittlichen Kraft ($r = ,66$ bzw. $r = ,76$), jedoch nicht des Ermüdungsindex mit

der Boulderleistung fest. Bei einem intermittierenden Test (10:3 s, 40 % MVC) wiesen BC ein höheres Kraft-Zeitintegral (force-time integral (FTI)) jedoch keine höhere Zeit bis Testabbruch (time till task failure (TTF)) auf als NC (Fryer et al., 2017). Bei einem intermittierendem all-out Test, bei dem, im Unterschied zu den intermittierenden Kraftausdauer tests, die Höhe der einzelnen Kräfteinsätze nicht auf einen Prozentsatz der MVC restringiert sind, sondern jedes Mal versucht wird, die höchstmögliche Kraft aufzubringen, unterschieden sich BC und NC nicht signifikant hinsichtlich der erbrachten Kraft (Macdonald & Callender, 2011).

- Die Oberkörperkraftausdauer in Form von der maximalen Anzahl an Klimmzügen innerhalb einer Minute und die TTF während dem isometrischen Hängen in einer angewinkelten Armposition (Bent-Arm-Hang) war bei BC signifikant höher als bei NC, während sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich der maximalen Anzahl an Liegestützen innerhalb einer Minute ergaben (Macdonald & Callender, 2011; Macias et al., 2015).
- Die Rumpfkraftausdauer in der Form mehrerer Tests (Tunk-Weber-Test for trunk flexion, Timed-Isometric-Leg-Lift, Soerensen-Back-Extension-Test) unterschied sich nicht signifikant zwischen BC und NC (Macdonald & Callender, 2011).
- Die Hüftbeweglichkeit korrelierte nicht signifikant mit der Boulderleistung (Wall et al., 2004).

4.2.1.4 Psychische Fähigkeiten

Die Untersuchung des Einflusses wettkampfbezogener Angstzustände auf die Leistung eines nationalen Boulderwettkampfes ergab, dass die mittels des State Trait Anxiety Inventory (STAI) erfasste Zustandsangst negativ mit der Boulderleistung korrelierte ($r = -,59$), während die Eigenschaftsangst sowie die Subkategorien des Competitive State Anxiety Inventory (CSAI) somatische Angst (SA), kognitive Angst und Zuversicht nicht signifikant mit der Leistung korrelierten (Bazancir et al., 2018).

4.2.2 Forschungsstand zu multivariaten Modellen

Bisher existieren wenige Studien, welche mittels multivariater Analysemethoden den relativen Einfluss mehrerer Variablen auf die Boulderleistung untersucht haben:

- Die von Ignjatović et al. (2016) verwendeten Gleichgewichtstests erklärten zusammen genommen 81,4 % der Leistung bei einem Jugendweltcup im Bouldern. In dem multiplen Regressionsmodell erwiesen sich alle 3 Tests als signifikante Prädiktoren. Im Gegensatz dazu ließ sich die Wettkampfleistung nicht durch die von Stanković et al. (2017) verwendeten allgemeinen Koordinationstests erklären.
- In der Studie von Ozimek, Krawczyk et al. (2017) erklärte das multiple Regressionsmodell 79,1 % des nationalen Rankings von 10 BC. Aus einer Vielzahl von inkludierten anthropometrischen Variablen (BH, BM, BMI, PI, RI, BF%, LBM, diverse Längen und Indices der Extremitäten und Körperteile sowie der Körpertyp) stellten die Körperfettmasse und der Armlängen-zu-Körpergrößenindex die Prädiktoren für das Ranking dar.

4.2.3 Konkludierung des Forschungsdesiderats

Aus dem bisherigen Forschungsstand zur Leistungsdiagnostik im Bouldern resultiert hinsichtlich eigener Forschungsarbeiten folgendes Forschungsdesiderat:

Zahlreiche Studien haben den Einfluss einzelner anthropometrischer, technischer, konditioneller und psychischer Merkmale auf die Leistung im Bouldern evaluiert und dabei mehrheitlich die SRCA als abhängige Variable verwendet. Bisher existiert eine Validierung der SRCA zur Quantifizierung der Leistung im Klettersport ausschließlich für das Leadklettern, sodass viele Studien möglicherweise hinsichtlich der Repräsentativität für das Wettkampfklettern limitiert sind. Die wenigen multivariaten Studien beziehen sich ausschließlich auf eine Komponente der sportlichen Leistung; bisher existiert keine Studie, welche den relativen Einfluss unterschiedlicher Komponenten der sportlichen Leistung (im

Sinne eines Leistungsstrukturmodells) auf die Wettkampfleistung im Bouldern untersucht hat.

In eigenen Forschungsarbeiten wurden, auf Basis des dargestellten Forschungsdesiderats, geschlechtsspezifische Leistungsstrukturmodelle erstellt, welche auf der Wettkampfleistung als abhängiger Variable basieren und leistungsrelevante Merkmale aus mehreren Komponenten der sportlichen Leistung beinhalten (siehe Fachartikel *Competitive Performance Predictors for Speed Climbing, Bouldering and Lead Climbing*).

4.3 Leistungsdiagnostik im Leadklettern

4.3.1 Forschungsstand zum Einfluss der einzelnen Komponenten

4.3.1.1 Innere Rahmenbedingungen

Im Folgenden ist der Forschungsstand bezüglich des Zusammenhangs zwischen einzelnen anthropometrischen Merkmalen und der Leadkletterleistung, einschließlich der Unterscheidung zwischen LC und NC bzw. zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus, zusammengefasst:

- Die BH unterscheidet sich nicht signifikant zwischen LC und NC, zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus und korreliert nicht signifikant mit der Leadkletterleistung (Bertuzzi et al., 2007; Donath et al., 2013; Došla & Meško, 2016; España-Romero et al., 2009; Esposito et al., 2009; Fanchini et al., 2013; Fryer, Dickson, Draper, Eltom et al., 2012; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015; Fryer et al., 2016; Grant et al., 2001; Laffaye et al., 2016; Michailov et al., 2015; Ozimek, Rokowski, et al., 2017; Philippe et al., 2012; Richmond et al., 2017; Tomaszewski et al., 2011).
- Das BM der LC ist niedriger als von NC, die Differenz ist jedoch nur in etwa der Hälfte der Studien signifikant (Došla & Meško, 2016; Esposito et al., 2009; Fanchini et al., 2013; MacLeod et al., 2007; Philippe et al., 2012; Tomaszewski et al., 2011). Das BM unterscheidet sich nicht signifikant zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus und korreliert nicht mit der Kletterleistung (Bertuzzi et al., 2007; Donath et al., 2013; Došla & Meško, 2016; España-Romero et al., 2009; Fryer, Dickson, Draper, Eltom et al., 2012; Grant et al., 1996; Laffaye et al., 2016; Michailov et al., 2015; Ozimek, Rokowski, et al., 2017; Ozimek et al., 2016; Richmond et al., 2017). Lediglich in der Studie von España-Romero et al. (2009) bestand in der Subgruppe der Frauen eine signifikante Korrelation zwischen dem BM und der Kletterleistung ($r = ,87$), nicht jedoch in der der Männer und auch nicht in der Gesamtstichprobe.
- Der BMI der LC ist niedriger als von NC, die Differenz wird jedoch nur in einer Studie signifikant, was daran liegen könnte, dass in den beiden an-

deren Studien (Sport-)Studenten mit einem durchschnittlichen, als normalgewichtig klassifizierten BMI rekrutiert wurden (Esposito et al., 2009; Philippe et al., 2012; Tomaszewski et al., 2011). In Deutschland weisen 75,4% (Frauen) bzw. 65,0% (Männer) der Vergleichsgruppe (18 - 29 Jahre, hohes Bildungsniveau) einen identisch klassifizierten BMI auf (Schienkiewitz et al., 2022). Der BMI unterscheidet sich nicht zwischen verschiedenen Leistungsniveaus, weist in der Hälfte der Studien jedoch eine signifikante Korrelation mit der Kletterleistung auf (Donath et al., 2013; España-Romero et al., 2009; Laffaye et al., 2016; Michailov et al., 2015; Ozimek, Rokowski et al., 2017; Richmond et al., 2017).

- Der BF% und die LBM sind in der Mehrzahl der Studien geringer bei LC als bei NC (Došla & Meško, 2016; Grant et al., 2001; MacLeod et al., 2007; Philippe et al., 2012; Tomaszewski et al., 2011). Der Forschungsstand zur BF% bezüglich der Differenzierung zwischen verschiedenen Leistungsniveaus ist uneinheitlich, wofür die geringen Unterschiede in der Kletterleistung zwischen den analysierten Subgruppen sowie die Rekrutierung von Kletterern mittlerer bis fortgeschrittener Leistungsniveaus (Klassifikation nach Draper et al. (2015)) ursächlich sein könnten (Bertuzzi et al., 2007; España-Romero et al., 2009; Fryer, Dickson, Draper, Eltom et al., 2012; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015; Fryer et al., 2016; Grant et al., 2001; Laffaye et al., 2016). Andere Studien haben hingegen eine Korrelation des BF% mit der Kletterleistung festgestellt (Baláš et al., 2012; Michailov et al., 2015). LBM und MM weisen hingegen keine leistungsniveaubezogenen Unterschiede und keine Korrelation mit der Kletterleistung auf (España-Romero et al., 2009; Laffaye et al., 2016; Ozimek, Rokowski et al., 2017).
- Die Armspannweite, die Armlänge und der Armspannweiten-zu-Körpergrößen-Index ist bei männlichen LC größer als bei NC, während sich bei weiblichen Kletterinnen keine signifikanten Unterschiede ergaben (Grant et al., 2001; Tomaszewski et al., 2011). Die Aussage basiert jedoch lediglich auf zwei einzelnen Studien. Keine Unterschiede existierten, mit Ausnahme des Armspannweiten-zu-Körpergrößen-Indexes in der Studie von Laffaye et al. (2016) zwischen LC verschiedener Leis-

tungsniveaus und es bestand auch keine signifikante Korrelation mit der Kletterleistung (Bertuzzi et al., 2007; Donath et al., 2013; España-Romero et al., 2009; Grant et al., 2001; Laffaye et al., 2016; Michailov et al., 2015; Ozimek, Rokowski et al., 2017).

- Der absolute und relativ zum BM gemessene Unterarmumfang ist bei LC signifikant höher als bei NC (Esposito et al., 2009; MacLeod et al., 2007; Tomaszewski et al., 2011). Fryer et al. (2017) stellten hingegen keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf das Unterarmvolumen fest. Zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus bestehen keine signifikanten Unterschiede, jedoch besteht eine signifikante Korrelation der Unterarmfläche, nicht jedoch des Unterarmumfangs mit der Kletterleistung (España-Romero et al., 2009; Ozimek, Rokowski et al., 2017).

4.3.1.2 Technik

Zur Diagnostik der Klettertechnik wurden unterschiedliche Messinstrumente und -verfahren eingesetzt. Mittels mit Kraftsensoren ausgestatteter Klettergriffe konnte gezeigt werden, dass erfahrene in Vergleich zu weniger erfahrenen Kletterern in den mechanischen Parametern (Kontaktzeiten, Krafteinsatz, Impuls, Reibungskoeffizient, Smoothness factor, Hausdorff Dimension) Werte ausweisen, die auf geringere Krafteinsätze und eine effizientere Klettertechnik zurückzuführen sind (Fuss & Niegl, 2008, 2010; Lechner et al., 2013). Bessere Kletterer wiesen beispielsweise eine höhere vertikale Fußbelastung, und somit geringere Belastung der oberen Extremitäten auf, die negativ mit Beanspruchungsparametern (VO_2 & HR) korrelierte und somit ein Indikator für eine bessere Kletterökonomie darstellt (Baláš, Panáčková, Jandová et al., 2014). Ein weiterer Indikator für eine gute Klettertechnik könnte der Körperschwerpunktverlauf darstellen: Bessere Kletterer wiesen einen kontinuierlicheren Verlauf und mehr Links-Rechtsverschiebungen auf (Fuss & Niegl, 2008; Zampagni et al., 2011). In weiteren Studien wurden klettertechnische Merkmale mittels fragebogenbasierten und computergestützten Tests sowie allgemeinen Koordinations- und Gleichgewichtstests analysiert. Diesbezügliche Studien zeigen, dass bessere Kletterer mehr aber vor allem funktionellere Informationen im Hinblick auf die imaginäre Bewältigung der Klettersequenz aus einer Routenvisualisierung extrahieren können, dies das Bewegungsrepertoire abbildet,

jedoch nicht die Kletterleistung aber dennoch den Kletterfluss positiv beeinflusst (Boschker et al., 2002; Pezzulo et al., 2010; Sanchez et al., 2012; Seifert et al., 2017). Einen fähigkeitszentrierten Ansatz verfolgten Sterkowicz et al. (2014): Die mittels eines computergestützten Tests erfassten koordinativen Fähigkeiten unterschieden sich nicht signifikant zwischen LC und NC, dennoch korrelierte ($r = -,66$) der Index aus einem Test zu Schnelligkeit, Genauigkeit und Präzision mit der Kletterleistung. Des Weiteren wies aus den von Ignjatović et al. (2016) verwendeten Gleichgewichtstest der Flamingo Test eine signifikante Korrelation ($r = ,74$) mit der Leistung bei einem Jugendweltcup im Leadklettern auf und auch in der Studie von Stanković et al. (2017) korrelierten 2 der verwendeten allgemeinen Koordinationstests mit dieser.

4.3.1.3 Kondition

Der Einfluss konditioneller Parameter auf die Leadkletterleistung ist mit am besten untersucht. Er ist jedoch, auch wie im Bouldern, hinsichtlich Ausdifferenziertheit und Einfluss abhängig von den untersuchten Merkmalen:

- Das am besten untersuchte Merkmal stellt die Fingermaximalkraft dar. Die Studienlage zeigt eindeutig, dass die in Relation zum BM gemessene Fingermaximalkraft zwischen LC und NC sowie zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus differenziert und mit der Kletterleistung korreliert (Fanchini et al., 2013; Fryer et al., 2017; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015; Fryer, Stoner, Scarrott et al., 2015; Grant et al., 2001; Grant et al., 1996; MacLeod et al., 2007; Michailov et al., 2018; Ozimek, Rokowski et al., 2017; Ozimek et al., 2016; Philippe et al., 2012; Staszkiwicz et al., 2018). Gleiches zeigt sich, abgesehen von einzelnen Ausnahmen, auch für die absolute Fingermaximalkraft (Fryer et al., 2017; Fryer, Stoner, Scarrott et al., 2015; Laffaye et al., 2016; MacLeod et al., 2007; Ozimek, Rokowski, et al., 2017; Philippe et al., 2012; Quaine et al., 2003; Staszkiwicz et al., 2018; Vigouroux & Quaine, 2006).
- Für die unspezifischere Handgriffkraft gibt es, wenn diese absolut gemessen wird, nur einige Studien, in denen diese sich zwischen LC und NC unterscheidet bzw. mit der Kletterleistung korreliert. In dem Großteil der Studien wies die Handgriffkraft jedoch weder Unterschiede zwischen

LC und NC noch zwischen verschiedenen Leistungsniveaus auf und korrelierte nicht mit der Kletterleistung (Augustsson et al., 2018; Došla & Meško, 2016; España-Romero et al., 2009; Esposito et al., 2009; Ferguson & Brown, 1997; Gajewski et al., 2009; Laffaye et al., 2016; Limonta et al., 2015; Ozimek et al., 2016; Staszkiwicz et al., 2018). Wird die Handgriffkraft hingegen relativ zum BM gemessen, sind die Studien hingegen in der Überzahl, in denen diese sich zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus unterschied bzw. mit der Kletterleistung korrelierte (Baláš et al., 2012; Bourne et al., 2011; Došla & Meško, 2016; España-Romero et al., 2009; Esposito et al., 2009; Gajewski et al., 2009; Grant et al., 2001; Grant et al., 1996; Ozimek et al., 2016; Staszkiwicz et al., 2018).

- Die Oberkörpermaximalkraft in Form der relativen, nicht jedoch der absoluten Blockierkraft bei einer 90 Grad Flexion im *Articulatio cubiti* differenziert zwischen LC und NC sowie zwischen unterschiedlichen Leistungsniveaus (Staszkiwicz et al., 2018). In der gleichen Studie war dies ebenfalls für die Ellenbogenflexion- und -extension sowie die Schulterextension der Fall, während hingegen bei Augustsson et al. (2018) lediglich die besten Kletterer eine höhere Maximalkraft in der Ellenbogenextension als die niederrangigsten, nicht jedoch als die mittulguten Kletterer aufwiesen. Für die Ellenbogenflexion, -pronation und supination ergaben sich hingegen keine leistungs-niveaubezogenen Unterschiede und keiner der Parameter korrelierte signifikant mit der Kletterleistung. Für das Einer-Wiederholungsmaximum (1 RM) im Bankdrücken und bei Klimmzügen bestanden ebenfalls keine Unterschiede zwischen LC und NC und LC verschiedener Leistungsniveaus sowie keine signifikanten Korrelationen mit der Kletterleistung (Laffaye et al., 2016; Ozimek, Rokowski et al., 2017; Ozimek et al., 2016).
- Die Kraft der unteren Extremitäten wurde mittels der erzielten Höhe bei einem einbeinigen dynamischen Aufstehen über einen hohen Tritt gemessen und differenzierte zwischen LC unterschiedlicher Leistungsniveaus und korrelierte mit der Kletterleistung ($r = ,67$) (Brent et al., 2009).

- Der Forschungsstand zur Schnell- und Explosivkraft der Fingerbeugemuskulatur kann folgendermaßen zusammengefasst werden: Die RFD_{peak} ist bei LC signifikant höher als bei NC, jedoch lediglich in einer der beiden Fingerstellungen (Fanchini et al., 2013). In der Studie von Staszkiwicz et al. (2018) wiesen LC bzw. die Gruppe der besseren LC eine höhere RFD_{peak} und kürzere Zeiten für das Erreichen der maximalen Kraft und der Hälfte der maximalen Kraft ($\Delta t_{F_{peak}}$ bzw. $\Delta t_{0,5F_{peak}}$) auf als NC bzw. die Gruppe der weniger guten Kletterer, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant. Die mittels eines Handdynamometers gemessene RFD_{peak} korrelierte nicht signifikant mit der Kletterleistung (Ozimek et al., 2016).
- Die Oberkörperschnellkraft in Form klimmzugähnlicher Schnellkrafttests differenziert zwischen LC und NC, zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus und steht signifikant mit der Kletterleistung im Zusammenhang (Draper, Dickson, Blackwell, Priestley et al., 2011; Laffaye et al., 2014; Laffaye et al., 2016). Für die Schnellkraft im Bankdrücken sowie die RFD_{peak} , $\Delta t_{F_{peak}}$ und $\Delta t_{0,5F_{peak}}$ isolierter Tests für die Ellenbogenflexion und -extension und die Schulterflexion und -extension ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen LC und NC und LC verschiedener Leistungsniveaus (Laffaye et al., 2016; Staszkiwicz et al., 2018).
- Die Sprungkraft unterschied sich nicht zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus und korrelierte nicht signifikant mit der Kletterleistung (España-Romero et al., 2009).
- Die Ausdauer wird hinsichtlich des Umfangs der beanspruchten Muskulatur zwischen allgemeiner, regionaler und lokaler Ausdauer differenziert (Hohmann et al., 2020).

In Bezug auf die allgemeine Ausdauer wiesen Kletterer eine mit Team- und Kampfsportlern vergleichbare, jedoch geringere VO_{2max} als Ausdauersportler auf (Schöffl et al., 2020). Kletterspezifisch gemessen (z.B. in Form eines Stufentests mit inkrementell zunehmender Wandneigung an einer Treadwall oder eines Stufentests an einem vertikalen Ruderergometers), stellt diese einen signifikanten Prädiktor der Kletterleistung dar

und differenziert zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus, während bei einer unspezifischen Messung mittels Laufbändern oder Ergometern dies nicht der Fall ist (Bertuzzi et al., 2007; Fryer, Dickson, Draper, Eltom et al., 2012; Fryer et al., 2018; Michailov et al., 2015; Michailov et al., 2017). Die HF_{\max} differenzierte hingegen nicht zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus und korrelierte nicht signifikant mit der Kletterleistung und wird daher als unbrauchbarer Parameter für die Diagnostik der kardiorespiratorischen Ausdauer im Leadklettern bezeichnet (España-Romero et al., 2009; Michailov et al., 2015). Dies trifft auf ähnliche Art und Weise für die LA_{post}^- zu. Insbesondere bei Stufentests bis zur Erschöpfung zeigten sich weder signifikante Unterschiede zwischen LC und NC noch eine signifikante Korrelation mit der Kletterleistung. Als besserer Indikator erwies sich die Laktatclearance, die sowohl mit der SRCA als auch mit dem Ranking in einem simulierten Kletterwettkampf korrelierte (Bertuzzi et al., 2012; España-Romero et al., 2009; Gajewski et al., 2009; Grant et al., 2003; Michailov et al., 2015; Michailov et al., 2017).

Die lokale, muskuläre Ausdauer in Form der Fingerkraftausdauer wurde mittels verschiedener Tests evaluiert, die sich teils auch hinsichtlich der dominanten Mechanismen der Energiebereitstellung unterscheiden (Maciejczyk et al., 2022). Beim sogenannten finger hang test, hängen die Probanden mit ihrem kompletten Körpergewicht an Griffen und die Zeitspanne bis zum Loslassen (TTF) wird als Messwert erfasst. Die TTF differenziert zwischen Kletterern unterschiedlicher Leistungsniveaus und korreliert signifikant mit der Kletterleistung (Baláš et al., 2012; Bergua et al., 2018; Ozimek, Rokowski et al., 2017; Ozimek et al., 2016). Ein ähnlicher Test stellt der kontinuierliche Fingerkraftausdauer test dar, bei dem die Belastungsintensität auf einen Prozentsatz der MVC festgelegt ist. Wird die kontinuierliche Fingerkraftausdauer kletterspezifisch und mit einer Intensität größer 40 % MVC gemessen, weisen die LC bzw. LC höherer Leistungsniveaus größere Werte bezüglich der TTF und insbesondere des FTI auf als NC bzw. LC niedrigerer Leistungsniveaus, und die

maximale und durchschnittliche Kraft, nicht jedoch der Ermüdungsindex korrelierten mit der Kletterleistung (Cutis & Bollen, 1993; Ferguson & Brown, 1997; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015; Limonta et al., 2015; MacLeod et al., 2007; Michailov et al., 2018; Ozimek et al., 2016; Philippe et al., 2012; Staszkievicz et al., 2018). Auch bei dem intermittierenden Fingerkraftausdauerstest, bei dem sich isometrische Kontraktionen von 5 bis 10 s mit kurzen Erholungsphasen von 2 bis 5 s abwechseln, weisen LC im Vergleich zu NC insbesondere ein höheres FTI, aber teils auch eine höhere Anzahl an Wiederholungen bzw. eine größere TTF auf. Bezüglich der Differenzierung zwischen LC verschiedener Leistungsniveaus ist die Studienlage ambivalent, und in der einzigen entsprechenden Studie korrelierte weder die TTF noch das FTI mit der Kletterleistung (Ferguson & Brown, 1997; Fryer et al., 2017; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015; Fryer, Stoner, Scarrott et al., 2015; MacLeod et al., 2007; Philippe et al., 2012; Quaine et al., 2003; Staszkievicz et al., 2018; Vigouroux & Quaine, 2006). Bei einem intermittierendem all-out Test ermüdeten die NC stärker als die LC, sodass diese sich signifikant hinsichtlich der Anzahl an Wiederholungen bzw. der Zeit, ab der die anfänglich vorgegebene Kraft unterschritten wurde und der durchschnittlichen Kraft der letzten der 36 vorgegebenen Wiederholungen relativ zur MVC, unterschieden (Vigouroux & Quaine, 2006). In anderen Studien differenzierte der mittels Handdynamometern gemessene Ermüdungsindex hingegen nicht zwischen LC und NC, LC verschiedener Leistungsniveaus und korrelierte nicht signifikant mit der Kletterleistung (España-Romero et al., 2009; Laffaye et al., 2016).

Neben den isolierten Fingerkraftausdauerstests wurden zur Diagnostik der komplexen kletterspezifischen Ausdauer Tests herangezogen, mit welchen diese unter leadkletterähnlichen Bedingungen gemessen wurde. Für die mittels verschiedener Protokolle ermittelten Parameter (TTF bzw. maximaler Winkel bei Treadwalltests mit inkrementeller Geschwindigkeit bzw. Wandneigung sowie der Anzahl der Kletterzüge innerhalb vorgegebener Zeit bzw. die Kletterzeit) wurden leistungsniveaubezogene Unter-

schiede und signifikante Korrelationen mit der Kletterleistung festgestellt (Baláš, Panáčková, Strejcová, et al., 2014; Bertuzzi et al., 2012; Cross, 2017; España-Romero et al., 2009; Ferrara III, 2018; Michailov et al., 2017).

Die bisher dargestellten Erkenntnisse zur Diagnostik der Fingerkraftausdauer beziehen sich auf Außenkriterien (Wiederholungszahlen, Kräfteinsätze etc.), es existieren jedoch zudem eine Reihe von Studien, welche den Einfluss physiologischer Parameter der muskulären Ausdauer auf die Kletterleistung analysiert haben (Limonta et al., 2015; MacLeod et al., 2007; Quaine et al., 2003; Vigouroux & Quaine, 2006). Hinführend auf die eigenen Forschungsarbeiten wird in Folge näher auf die Messungen mittels Nahinfrarotspektroskopie eingegangen. Diese zeigen, dass Spitzenkletterer im Vergleich zu LC mit einem niedrigeren Leistungsniveau sowie NC eine signifikant größere und schnellere Sauerstoffausnutzung (Deoxygenation) bei kontinuierlichen Fingerkraftausdauer tests sowie während inkrementeller Treadwalltests aufweisen, die zudem einen signifikanten Prädiktor ($R^2 = ,30$) für die SRCA darstellt (Fryer et al. 2018; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015, Fryer, Stoner, Scarrott et al., 2015; MacLeod et al., 2007). Des Weiteren zeichnen sich Spitzenkletterer durch eine schnellere Oxygenierung aus: Während eines intermittierenden Fingerkraftausdauer tests erklärte diese 41 % der Varianz des FTI (MacLeod et al., 2007) und wies leistungsniveaubezogene Unterschiede in Form der sogenannten Time-To-Half-Recovery ($T_{1/2}$) und Oxygenierungsrate auf (Fryer et al., 2017; Fryer, Stoner, Dickson et al., 2015). In den Studien von Fryer et al. (2016) und Fryer et al. (2018) ergab die lineare Regression, dass eine Abnahme der $T_{1/2}$ um eine Sekunde mit einer Steigerung der Kletterleistung um 0,65 bzw. 0,74 Schwierigkeitsgrade assoziiert war.

- Die Oberkörperkraftausdauer in Form von der maximalen Anzahl an Klimmzügen innerhalb einer Minute, der Bent-Arm-Hang TTF, der Ermüdungsindex bei einem explosiven Klimmzug mit Loslassen beider Hände (Arm-Jump), die maximale und durchschnittliche Leistung bei dem

Wingate-Aerobic-Upper-Body-Power Test sowie die TTF und die maximale Leistung relativ zum BM beim vertikalen Rudern war signifikant höher bei LC bzw. LC eines höheren Leistungsniveaus als bei NC bzw. LC eines niedrigeren Leistungsniveaus. Die Bent-Arm-Hang TTF sowie die TTF und die maximale Leistung (in Relation zum BM) beim vertikalen Rudern korrelierten zudem mit der Kletterleistung, nicht jedoch die maximale Anzahl an Klimmzügen (Baláš et al., 2012; Bertuzzi et al., 2007; Cross, 2017; Došla & Meško, 2016; Grant et al., 1996; Laffaye et al., 2016; Michailov et al., 2015; Ozimek, Rokowski et al., 2017; Ozimek et al., 2016).

- Die Rumpfkraftausdauer in der Form von Curl-Ups und des Soerensen-Back-Extension Tests unterschied sich nicht signifikant zwischen LC und NC sowie LC verschiedener Leistungsniveaus (Grant et al., 2001; Grant et al., 1996; Laffaye et al., 2016).
- Die Beweglichkeit in Form des Sit-and-Reach Test sowie des Foot-Raise Tests differenzierte weder zwischen LC und NC noch zwischen Kletterern verschiedenerer Leistungsniveaus (España-Romero et al., 2009; Grant et al., 2001; Grant et al., 1996).

4.3.1.4 Psychische Fähigkeiten

Sanchez et al. (2010) untersuchten den Einfluss wettkampfsportspezifischer Angstzustände mittels des CSAI-2 sowie positiver und negativer Empfindungen mittels des Positive and Negative Affect Schedule (PANAS) auf die Wettkampfleistung. Erfolgreichere Wettkampfkletterer hatten ein höheres Maß an SA als die weniger erfolgreichen und die Wettkampfleistung korrelierte positiv mit SA ($r = ,54$) und Positiver Effekt ($r = ,67$), was bedeutet, dass erfolgreiche Wettkampfkletterer gleichzeitig ein hohes Maß an wahrgenommener körperlicher Erregung (SA) aufweisen und sich in einen Zustand von Enthusiasmus, Aktivität und Wachheit (Positiver Effekt) befinden. In der Studie von Draper, Dickson, Fryer et al. (2011) mit mittelguten Kletterern, bestanden hingegen keine Unterschiede zwischen den Kletterern mit erfolgreichen und nicht-erfolgreichen Begehungen hinsichtlich kognitiver und somatischer Angst, jedoch besaßen die erfolgreichen Kletterer ein höheres Selbstbewusstsein. Außerdem fanden Aşçi

et al. (2006) keine Unterschiede zwischen verschiedenen Leistungsniveaus hinsichtlich Sensation Seeking, körperlicher Selbstwahrnehmung und Motivationsmodus.

4.3.2 Forschungsstand zu multivariaten Modellen

Im Leadklettern liegen einige multivariate Studien vor. Aufgrund der Inkludierung unterschiedlicher Variablen sowie weiterer Ursachen, wie unterschiedliche Stichprobencharakteristika, fällt die Varianzaufklärung der extrahierten Faktoren unterschiedlich aus. Gemeinsam liegt den multivariaten Studien jedoch zugrunde, dass diejenigen Faktoren, auf welchen trainierbare, körperliche und überwiegend konditionelle Variablen laden, über die höchste Varianzaufklärung verfügen:

Mermier et al. (2000), beispielsweise, extrahierten auf Basis einer Vielzahl von anthropometrischen und konditionellen Variablen 3 Faktoren („Training“, „Flexibilität“ und „Anthropometrie“), welche 39 %, 15 % und 10 % der Gesamtvarianz eines simulierten Leadkletterwettkampfes erklärten. Die auf den Faktorwerten basierte multiple Regression erklärte insgesamt 61 % der Kletterleistung wobei jedoch nur der „Trainingsfaktor“ einen signifikanten β -Koeffizienten aufwies und 59 % der Kletterleistung erklärte. Auf den „Trainingsfaktor“ luden Variablen wie die isokinetisch gemessene Schulter- und Kniekraft, die Handgriffkraft, die mittels des Wingate Tests gemessene Ausdauer der oberen und unteren Extremitäten, die Bent-Arm-Hang TTF, der BF% sowie die SRCA. Zu einem ähnlichen Resultat kamen Laffaye et al. (2016): Die 3 extrahierten Faktoren, welche basierend auf den Faktorladungen der entsprechenden Variablen als „Training“, „Muscle“ und „Anthropometrie“ bezeichnet wurden, erklärten einzeln 46 %, 4 % und 4 % bzw. zusammengenommen 54 % der SRCA RP-Kletterleistung. Auch in der Studie von Fryer et al. (2018) sagten trainierbare hämodynamische und kardiorespiratorische Merkmale einen Großteil (67 %) der RP-Kletterleistung vorher. Baláš et al. (2012) identifizierten mittels des Vergleichs verschiedener Strukturgleichungsmodelle die latente Variable „Hand- und Armkraft bzw. -kraftausdauer“, die sich aus den Variablen Handgriffkraft, der Bent-Arm-Hang TTF sowie der Fingerkraftausdauer in Form

des Finger-Hangs, zusammensetzte. Die exogenen Variablen BF%, Klettervolumen und Klettererfahrung beeinflussten die latente Variable, lediglich für den BF% bestand zusätzlich ein direkter Zusammenhang mit Kletterleistung. Insgesamt erklärte das Modell 97 % der SRCA RP-Kletterleistung.

Lediglich Magiera et al. (2013) berichten von einer homogeneren Verteilung: Die drei Komponenten, welche die physischen (anthropometrische und konditionelle), technischen und psychischen Merkmale repräsentieren, erklärten 38 %, 33 % und 25 % der SRCA im RP und OS Klettern. Auch in der Studie von Stanković et al. (2017) konnte die Leistung bei einem Jugendweltcup im Leadklettern durch 3 allgemeine Koordinationstests signifikant vorhergesagt werden ($R^2 = ,66$), gleiches galt jedoch nicht für 3 allgemeine Gleichgewichtstests (Ignjatović et al., 2016).

4.3.3 Konkludierung des Forschungsdesiderats

Aus dem bisherigen Forschungsstand leitet sich im Hinblick auf die eigenen Forschungsarbeiten folgendes Forschungsdesiderat ab:

Der Einfluss einzelner Merkmale auf die Leistung im Leadklettern wurde in zahlreichen Studien untersucht. Insbesondere für die Diagnostik der anthropometrischen und konditionellen Leistungsfaktoren liegen zahlreiche validierte Tests vor, welche hinsichtlich entsprechender Fragestellungen und Untersuchungsdesigns zielgerichtet eingesetzt werden können. Tests zur trainingswissenschaftlichen Diagnostik von technischen und psychischen Leistungsfaktoren existieren, eine standardisierte Anwendung im Rahmen von trainingspraktischen Leistungsdiagnostiken gestaltet sich aufgrund der Abhängigkeit von externen Bedingungen (Wettkampf, Testroute etc.) jedoch schwierig.

In Bezug auf die konditionellen Leistungsfaktoren handelt es sich bei der Fingerkraftausdauer um eines der am häufigsten untersuchten Merkmale mit hoher kletterspezifischer Relevanz. Dennoch existieren bisher weder einheitliche Testkriterien hinsichtlich der Intensität sowie der Dauer von Be- bzw. Entlastungsphasen bei intermittierenden Tests noch für die Testabbruchkriterien. Die ersten beiden Punkte lassen sich aus Wettkampfanalysen sowie

Überlegungen zur Belastungsintensität ableiten (Michailov et al., 2018), für die Wahl der Testabbruchkriterien gab es jedoch bisher keine Anhaltspunkte. Zudem gibt es nur wenige Studien (Baláš, Gajdošík, Giles et al., 2021; MacLeod et al., 2007; Rokowski et al., 2021), welche den Zusammenhang der Testleistung intermittierender Fingerkraftausdauer tests mit der Kletterleistung untersucht haben.

In eigenen Forschungsarbeiten wurden daher die Testabbruchkriterien eines intermittierenden Fingerkraftausdauer tests basierend auf dem korrelativen Zusammenhang mit der Kletterleistung evaluiert (siehe Fachartikel *Optimization of an Intermittent Finger Endurance Test for Climbers Regarding Gender and Deviation in Force and Pulling Time*).

Darüber hinaus verwendeten die meisten Studien, wie im vorherigen Kapitel dargestellt, Außenkriterien zur Diagnostik der Fingerkraftausdauer, auch wenn bereits einige Studien existieren, welche den Einfluss physiologischer Parameter der muskulären Ausdauer auf die Kletterleistung analysiert haben. Die Nahinfrarotspektroskopie stellt in diesem Kontext ein validiertes Messverfahren dar, mithilfe dessen lokale Beanspruchungs- und Ermüdungsprozesse auch in relativ kleinen Muskeln wie den Fingerflexoren nichtinvasiv messbar sind. Im Klettern wurde diese während venöser Okklusionstests, kontinuierlicher und intermittierender Fingerkraftausdauer tests sowie inkrementeller Treadwalltests angewendet. Bisherige Studien mit intermittierenden Fingerausdauer tests evaluierten einzelne Parameter wie die Oxygenierung des O₂Hb und des TSI während der Entlastungsphasen der intermittierenden Kontraktionen, sowie die maximale Entsättigung mittels des TSI.

Ziel meiner eigenen Forschungsarbeiten war es daher zum einen, NIRS-Messungen in einem simulierten Leadkletterwettkampf durchzuführen um die Aussagekraft bestimmter NIRS-Parameter über den Ermüdungszustand der Fingerbeugemuskelatur zu evaluieren. Und zum anderen mehrere, während eines intermittierenden Fingerkraftausdauer tests erhobene NIRS-Parameter multifaktoriell hinsichtlich ihres prädiktiven Wertes für die Fingerkraftausdauer zu analysieren (siehe Fachartikel *Predictive value of forearm muscle oxygenati-*

on parameters for intermittent finger endurance and competitive climbing performance).

Im Leadklettern existieren einige multivariate Studien, welche fast ausschließlich alle die SRCA als abhängige Variable verwendeten. Obwohl die SRCA ein valides Maß zur Quantifizierung der Leadkletterleistung darstellt (Draper, Dickson, Blackwell, Fryer et al., 2011), wurde diese bisher nicht hinsichtlich ihrer Repräsentativität für die Wettkampfleistung evaluiert. Die einzigen multivariaten Studien, die die Wettkampfleistung als abhängige Variable verwendeten, beziehen sich ausschließlich auf eine Komponente der sportlichen Leistung. Wie auch im Bouldern, gibt es im Leadklettern bisher keine Studie, welche den relativen Einfluss unterschiedlicher Komponenten der sportlichen Leistung auf die Wettkampfleistung analysierte.

Daraus leitete sich das Forschungsziel ab, Leistungsstrukturmodelle für das Leadklettern mit der Wettkampfleistung als abhängiger Variable zu erstellen (siehe Fachartikel *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering, and Lead Climbing*).

4.4 Fachartikel

4.4.1 Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering, and Lead Climbing

Autoren Marvin Winkler, Prof. Dr. Stefan Künzell & Prof.in Dr. Claudia Augste

Publikationsstatus Veröffentlicht am 24.07.2023 im Journal of Sports Sciences

DOI <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2239598>

4.4.2 Optimization of an intermittent finger endurance test for climbers regarding gender and deviation in force and pulling time

Autoren Prof.in Dr. Claudia Augste, Marvin Winkler & Prof. Dr. Stefan Künzell

Publikationsstatus Veröffentlicht am 23.05.2022 in Frontiers in Sports and Active Living

DOI <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.902521>

4.4.3 *Predictive value of forearm muscle oxygenation parameters for intermittent finger endurance and competitive climbing performance*

Autoren Marvin Winkler, Prof. Dr. Stefan Künzell & Prof.in Dr. Claudia Augste

Publikationsstatus Veröffentlicht am 19.07.2023 in Sport Sciences for Health

DOI <https://doi.org/10.1007/s11332-023-01072-w>

5 Diskussion

Die vorliegende Doktorarbeit befasst sich mit der Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern.

Der Leistungsdiagnostik kommt eine zentrale Rolle im Bereich der Trainingswissenschaften zu. Im Sinne der trainingswissenschaftlichen Leistungsdiagnostik erfolgt durch diese eine Strukturierung der sportlichen Leistung, sodass basierend auf der Identifikation von Leistungsvoraussetzungen und Leistungskomponenten die Leistungsstruktur einer sportlichen Leistung modelliert werden kann (Hohmann et al., 2020).

Zur Strukturierung der sportlichen Leistung existieren verschiedene Modellvorstellungen, welche in dem Kapitel 2.1 beschrieben wurden. Ein allgemeingültiges Modell der sportlichen Leistung existiert jedoch nicht, da sich die Modellvorstellungen hinsichtlich des Modellzwecks unterscheiden (Hohmann et al., 2020). Im Sinne der Leistungsstrukturanalyse sollte nicht nur eine Aufzählung kletterwettkampfspezifischer Leistungsvoraussetzungen und -komponenten entsprechend den heuristischen Modellen, sondern vielmehr eine datenzentrierte Modellierung der Leistungsstruktur vorgenommen werden, sodass Leistungsstrukturmodelle mit empirischer Prüfung für das Wettkampfklettern erstellt wurden. Das diesbezügliche Forschungsdesiderat dafür wurde basierend auf dem bisherigen Forschungsstand zur Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern konkludiert (Kapitel 4).

Für die Erstellung von Leistungsstrukturmodellen existiert ein theoretisch beschriebenes Vorgehen, welches sich in die Schritte Hierarchisierung und Modellbildung, Priorisierung und Bestimmung der internen Ordnung untergliedert (Hohmann et al., 2020). An diesem Vorgehen orientierte sich sowohl das eigene Vorgehen zur Erstellung der Leistungsstrukturmodelle als auch die Strukturierung der Dissertation. Im Folgenden fungiert dieses Vorgehen auch als Leitfaden, anhand dessen der Gesamtzusammenhang der eigenen Forschungsergebnisse diskutiert wird.

5.1 Hierarchisierung und Modellbildung

Der erste Schritt des theoretischen Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen besteht in der Hierarchisierung und Modellbildung. Wie in dem Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns* beschrieben, wurde davon ausgegangen, dass die komplexe Wettkampfleistung nicht vollständig durch die Leistungsvoraussetzungen und -komponenten erklärbar sei, sodass indeterministische, hierarchische Leistungsstrukturmodelle als Grundlage gewählt wurden. Diese Annahme wurde durch die Varianzaufklärung der Leistungsstrukturmodelle bestätigt, die zwischen $R^2 = ,348$ und $R^2 = ,557$ betrug (siehe Fachartikel *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering and Lead Climbing*).

5.2 Priorisierung

Im Zuge des zweiten Schrittes des theoretischen Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen, der Priorisierung sind 1. alle hypothetisch leistungsrelevanten Merkmale zu identifizieren sowie 2. aus diesen logisch leistungsrelevante und 3. empirisch-statistisch leistungsrelevante Merkmale zu selektieren bevor 4. dessen Priorisierung anhand des Korrelationskoeffizienten mit der Kriteriumsvariable erfolgt (Hohmann et al., 2020).

1. Die Identifikation der hypothetisch leistungsrelevanten Merkmale basierte einerseits auf dem im Kapitel 4 beschriebenen Forschungsstand zur Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern⁷ sowie andererseits auf den diesbezüglichen Interviews mit Leistungstrainern (Augste & Künzell, 2017), um, entsprechend dem Vorgehen von Hohmann et al. (2020), die in der Praxis als relevant erachteten Merkmale auch zu erfassen. Als Synthese dieses Arbeitsschrittes wurden heuristische Modelle der Struktur der sportlichen Leistung als Basis herangezogen, welche inhaltlich mit den identifizierten hypothetisch leistungsrelevanten Merkmalen besetzt wurden. Mittlerweile bestehen einige Übersichtsarbeiten (López Laval & Sitko, 2019; Saul et al., 2019; Stien et al., 2022) sowie ein weiteres Experteninterview (Sanchez et al., 2019), welche in zukünftigen ähnlichen Forschungsvorhaben als Ausgangspunkt konsultiert werden können.

Im Allgemeinen bestätigen die neueren Studien den bisherigen Forschungsstand zur Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern:

- Speed: Neuere Studien bestätigen den geringen Einfluss anthropometrischer Merkmale auf die Leistung im Speedklettern bei

⁷ Der Forschungsstand fasst die Studienlage hinsichtlich Leistungsvoraussetzungen und -komponenten zusammen, deren Einfluss auf die Kletterleistung mittels empirisch-statistischer Methoden analysiert wurde. Dennoch sind diese hierbei als hypothetisch leistungsrelevant angeführt, da ihre empirisch-statistische Relevanz für die Wettkampfleistung erst in anschließenden Arbeitsschritten überprüft wurde und aufgrund mehrerer Gründe (u.a. andere abhängige Variable und Stichprobencharakteristika sowie zum Teil ausschließlicher Nachweis der Relevanz über univariate Methoden) nicht als gegeben angenommen wurde.

männlichen Spitzenathleten (Krawczyk et al., 2019; Krawczyk et al., 2020). Für die Diagnostik der konditionellen Merkmale erwies sich der CMJ ohne Armeinsatz als geeigneter Test (Krawczyk et al., 2019), wobei sich die Sprunghöhe, die Kontraktionsgeschwindigkeit sowie die Leistung, nicht jedoch die Kraft als aussagekräftige Parameter erwiesen (Krawczyk et al., 2020). Ein Fahrradergometer test erwies sich hingegen nicht als geeignetes diagnostisches Testverfahren (Krawczyk et al., 2021).

- Bouldern: Auch im Bouldern untermauern neuere Studien den geringen Einfluss anthropometrischer Merkmale auf die SRCA (Gąsior, 2020; Giles, Barnes et al., 2021; Stefan et al., 2022; Torr et al., 2020). Lediglich Giles, Barnes et al. (2021) fanden einen niedrigeren BF% von Elitebouldererinnen als von BC niedrigerer Leistungsniveaus, welches im Kontrast zu der entsprechenden Studie des bisherigen Forschungsstands steht (Wall et al., 2004). Dem Forschungsstand zur Technik ist die Studie von Gąsior (2020) hinzuzufügen, in welcher BC eines höheren Leistungsniveaus eine bessere kinästhetische Differenzierungsfähigkeit in Form einer exakteren Erfüllung der Gewichtsverteilungsvorgaben zwischen linker und rechter Extremität aufwiesen als BC eines niedrigeren Leistungsniveaus. Eine weitere Studie zeigte, dass ein höheres Leistungsniveau u.a. mit weniger Fehlern und Abweichungen von der als optimal angesehenen Bewegungssequenz assoziiert war (Medernach & Memmert, 2021).
Der Forschungsstand zur Kondition wird durch die neueren Studien weitestgehend bestätigt. Dies bezieht sich insbesondere auf die hohe Relevanz der Fingermaximalkraft und Oberkörperschnellkraft für die Boulderleistung (Gąsior, 2020; Giles, Barnes et al., 2021; Stefan et al., 2022; Torr et al., 2020).
- Lead: Im Leadklettern bestehen für die anthropometrischen Merkmale BH, BM, BMI und Armlängen-zu-Körpergrößenindex

keine leistungsniveaubezogenen Unterschiede zwischen LC und NC sowie überwiegend auch keine signifikanten Korrelationen mit der Kletterleistung (Giles, Barnes et al., 2021; Labott et al., 2020; Marsala, 2019; Przeliorz-Pyszczyk et al., 2019; Stien et al., 2021; Torr et al., 2020). Bezüglich des BF% zeigt eine weitere Studie einen geringeren BF% von LC als von NC, während auch die aktuelle Studienlage zum BF% hinsichtlich der Differenzierung zwischen verschiedenen Leistungsniveaus bzw. der Korrelation mit der Kletterleistung uneinheitlich ist (Giles, Barnes et al., 2021; Marsala, 2019; Przeliorz-Pyszczyk et al., 2019).

Zur Diagnostik der technischen und taktischen Merkmale wurde ein Beobachtungsbogen entwickelt, anhand dessen Score 61 % der SRCA vorhergesagt werden konnte, während andere technische Messungen wie die geometrische Entropie und die Klettergeschwindigkeit nur 16 % bzw. 52 % der Varianz erklärten (Taylor et al., 2020).

Hinsichtlich der konditionellen Merkmale bestätigen neuere Studien die hohe Relevanz der Fingermaximalkraft und Fingerkraftausdauer (Baláš, Gajdošík, Giles et al., 2021; Bergua-Gómez et al., 2022; Giles, Barnes et al., 2021; Giles, Hartley et al., 2021; Levernier & Laffaye, 2021; Marcolin et al., 2022; Rokowski et al., 2021; Torr et al., 2020). Der Forschungsstand zur intermittierenden Fingerkraftausdauer hinsichtlich der Differenzierung von LC verschiedener Leistungsniveaus bzw. der Korrelation mit der Kletterleistung ist auch innerhalb sowie unter Berücksichtigung der neueren Studien uneinheitlich (Baláš, Gajdošík, Giles et al., 2021; Rokowski et al., 2021). Im Gegensatz zu den bisherigen Studien zeigt sich in den neueren jedoch eine hohe Leistungsrelevanz der Schnell- und Explosivkraft der Fingerbeugemuskulatur insbesondere, wenn die RFD basierend auf relativen anstelle den absoluten Zeitpunkten berechnet wird (Levernier & Laffaye, 2021; Stien et al., 2021; Vereide et al., 2022).

Der Forschungsstand der psychischen Merkmale wurde durch einige weitere Studien ergänzt: Folglich besteht kein signifikanter Zusammenhang mit der emotionalen Intelligenz als Eigenschaft und der SRCA, für die Komponente *Facilitation Thought* des Mayer-Salovey-Caruso Emotional Intelligence Test (MSCEIT), welche sich auf das situationsspezifische Nutzen von Emotionen bezieht, besteht hingegen ein negativer Zusammenhang mit der Kletterleistung (Garrido-Palomino & España-Romero, 2019). Für die Aufmerksamkeit (Attention) konnte ein Zusammenhang mit der OS-, nicht jedoch der RP-Kletterleistung nachgewiesen werden (Garrido-Palomino et al., 2020).

2. Da im nächsten Schritt zur Selektion der logisch leistungsrelevanten Merkmale aus denen der hypothetisch leistungsrelevanten, Kenntnisse über das Belastungsprofil der Wettkämpfe erforderlich sind, wurde in dem zweiten Teil dieser Arbeit (Belastungsprofil des Wettkampfkletterns) der diesbezügliche Forschungsstand zusammengefasst (Kapitel 3) und basierend auf dem konkludierten Forschungsdesiderat die 3 eigenen Forschungsarbeiten in diesem Bereich angeführt. Im Folgenden ist für diese jeweils aufgezeigt, welche konkreten Ergebnisse für die nachfolgenden Schritte der Priorisierung extrahiert wurden.
 - In dem Fachartikel *The Load Structure in International Competitive Climbing* wurde die quantitative äußere Wettkampfbelastung von internationalen Kletterwettkämpfen analysiert. Im Leadklettern ist diese, unter dem Aspekt der Fingerbeugemuskulatur betrachtet, durch eine intermittierende Abfolge von Belastungs- und Entlastungsphasen gekennzeichnet, deren, über alle Versuche gemittelte, durchschnittliche Dauer 6,4 bzw. 1,8 s betrug, sodass sich aufgerundet ein Belastungs-Entlastungsrhythmus von 7:2 s ergab. Da das Ziel isolierter Tests darin besteht einzelne Merkmale unter entsprechend des Belastungsprofils repräsentativen Bedingungen zu messen (Michailov et al., 2018; Rhea et al., 2006), wurde der

ermittelte Belastungs-Entlastungsrhythmus für den intermittierenden Fingerkraftausdauer test übernommen, welcher hinsichtlich zulässiger Kraft- und Zeitabweichungen evaluiert wurde (siehe Fachartikel *Optimization of an intermittent finger endurance test for climbers regarding gender and deviation in force and pulling time*) sowie zur Identifikation von NIRS-Parametern hinsichtlich ihres prädiktiven Wertes für die Fingerkraftausdauer (siehe Fachartikel *Predictive value of forearm muscle oxygenation parameters for intermittent finger endurance and competitive climbing performance*) und zur Diagnostik der intermittierenden Fingerkraftausdauer im Rahmen der Erstellung der Leistungsstrukturmodelle (siehe Fachartikel *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering and Lead Climbing*) eingesetzt wurde.

- In dem Fachartikel *Athletes' performance in different boulder types at international bouldering competitions* wurde die Häufigkeitsverteilung von Boulder kategorien sowie die Erfolgsrate der Athleten in Abhängigkeit dieser analysiert. Bouldersequenzen mit dynamischen Bewegungen als prädominante Schwierigkeit kamen insgesamt am häufigsten vor (52,5 %) und wiesen eine höhere Schwierigkeit im Vergleich zu Bouldersequenzen anderer Kategorien auf. Daraus wurde geschlossen, dass der Koordination im Wettkampfbouldern eine entscheidende Bedeutung zukommt, was auch von den Leistungstrainern im Rahmen der Interviews betont wurde (Augste & Künzler, 2017). Das koordinative Anforderungsprofil der dynamischen Bewegungen ist insbesondere durch die simultane Koordination der Extremitäten gekennzeichnet.
- In dem Fachartikel *Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering* wurde die Erfolgsrate nach einem Fehlversuch in Abhängigkeit eines Strategiewechsels analysiert. Der Wechsel zu einer alternativen Bewegungsabfolge wies eine höhere Erfolgswahrscheinlichkeit auf als die Beibehal-

tung der vorherigen und es bestand eine Korrelation zwischen der Wechselhäufigkeit und dem Gesamtweltcupranking der Athleten, die sich für mindestens eine Finalrunde qualifizierten. Daraus wurde geschlussfolgert, dass die taktische Komponente des Strategiewechsels nach einem Fehlversuch eine hohe wettkampfspezifische Relevanz aufweist.

Auf Basis dieser Ausführungen wird die Bedeutung der Belastungsprofilanalyse für die Erstellung der Leistungsstrukturmodelle als finalen Schritt der Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Leistungsdiagnostik deutlich. Demzufolge kann durch diese nicht nur die Selektion logisch-leistungsrelevanter Merkmale aus denen der hypothetisch-leistungsrelevanten erfolgen, sondern auch weitere Merkmale bestimmt werden, die im Zuge der Bestimmung der hypothetisch leistungsrelevanten Merkmale mittels Literaturrecherche und Experteninterviews nicht identifiziert wurden. Darüber hinaus können durch die Belastungsprofilanalyse Informationen gewonnen werden, welche die Entwicklung von Tests ermöglichen, die einzelne Merkmale unter entsprechend des Belastungsprofils repräsentativen Bedingungen messen.

Durch diese Erkenntnisse wurde eine Modifikation des von Hohmann et al. (2020) beschriebenen Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen vorgeschlagen, die in der Zusammenlegung der beiden ersten Arbeitsschritte der Priorisierung, der Identifikation hypothetisch leistungsrelevanter und der Selektion logisch-leistungsrelevanter Merkmale aus ebendiesen besteht (siehe Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns*).

Darüber hinaus wurde angeregt, den bisherigen ersten Schritt der Hierarchisierung und Modellbildung zukünftig erst nach der Identifikation hypothetisch leistungsrelevanter sowie der Selektion logisch leistungsrelevanter Merkmale (Teil des bisherigen zweiten Schrittes) durchzuführen, da dadurch die Modellbildung basierend auf einer größeren Wissensgrundlage erfolgen kann (siehe Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im*

Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns).

3. Im dritten Schritt der Priorisierung sind aus den logisch leistungsrelevanten Merkmalen die empirisch-statistisch leistungsrelevanten Merkmale zu bestimmen. Entsprechend beinhaltet dieser Schritt die Testauswahl und ggfs. -entwicklung, sowie die anschließende statistische Bestimmung der Leistungsrelevanz. Die methodischen Schwierigkeiten und dessen praktische Lösungen dieser jeweiligen Teilschritte wurde in dem Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns* dargestellt und diese werden in den nachfolgenden Ausführungen nochmal im Kontext des Gesamtzusammenhangs dieser Arbeit diskutiert.
 - Bezüglich der Testauswahl bestand folgende Problematik: Für die Diagnostik der meisten anthropometrischen und konditionellen Leistungsfaktoren liegen standardisierte und validierte Tests vor (siehe Forschungsstand zur Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern). Den technischen, taktischen und psychischen Leistungsfaktoren wird eine hohe Relevanz für die Wettkampfleistung zugeschrieben (Augste & Künzell, 2017) und es existieren auch einige Studien, welche deren Zusammenhang mit der Kletterleistung bzw. leistungsniveaubezogene Unterschiede empirisch nachweisen konnten (Aşçi et al., 2006; Baláš, Panáčková, Jandová et al., 2014; Bazancir et al., 2018; Boschker et al., 2002; Draper, Dickson, Fryer et al., 2011; Fuss & Niegl, 2008, 2010; Ignjatović et al., 2016; Lechner et al., 2013; Pezzulo et al., 2010; Sanchez et al., 2010; Sanchez et al., 2012; Stanković et al., 2017; Sterkowicz et al., 2014; Zampagni et al., 2011). Auch die eigenen Forschungsergebnisse des Fachartikels *Athletes' performance in different boulder types at international bouldering competitions* und des Fachartikels *Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering*, welche einen höheren Anteil an bewältigten Sequenzen mit dynamischen Bewegungen

als prädominante Schwierigkeit von Top20 BC der Weltrangliste als von BC eines niedrigeren Rangs bzw. einen Zusammenhang zwischen der Strategiewechselhäufigkeit nach einem Fehlversuch und dem Gesamtweltcupranking nachgewiesen haben, sind in diesem Kontext anzuführen. Eine standardisierte Implementierung der Diagnostik der technischen, taktischen und psychischen Leistungsfaktoren, sowohl im Sinne trainingswissenschaftlicher als auch trainingspraktischer Leistungsdiagnostiken, gestaltet sich jedoch, aufgrund der Abhängigkeit der in der Literatur beschriebenen Tests von externen Bedingungen wie Wettkämpfen oder Testrouten, schwierig. Auch zahlreiche der neueren Studien (Heilmann, 2021; Medernach & Memmert, 2021; Seifert et al., 2020; Taylor et al., 2020) weisen diese Abhängigkeit auf, sodass hier ein großer Bedarf für weiterführende Studien existiert.

- Aufgrund der oben geschilderten Problematik bei der Testauswahl zur Diagnostik der technischen, taktischen und psychischen Leistungsfaktoren in Verbindung mit der hohen zugesprochenen und teils empirisch nachgewiesenen Relevanz dieser, wurde versucht eigene Tests für diese zu entwickeln.

Konkret wurde ein Test zur Quantifizierung des in dem Fachartikel *Athletes' performance in different boulder types at international bouldering competitions* identifizierten koordinativen Anforderungsprofils dynamischer Bewegungen, der simultanen Koordination mehrerer Extremitäten entwickelt. Die Reliabilität zwischen einzelnen Versuchen wurde basierend auf einem Intraklassenkoeffizient (ICC) von ,86 als „gut“ klassifiziert (Koo & Li, 2016) und das Testergebnis korrelierte signifikant mit den Kletterleistungen in allen Disziplinen (Augste et al., 2020a).

Zudem wurde ein Test für die von Experten als wichtig bezeichnete Fähigkeit des Routenlesens (Augste & Künzell, 2017) entwickelt, dessen Relevanz auch durch einige Studien empirisch

nachgewiesen ist (Boschker et al., 2002; Pezzulo et al., 2010; Sanchez et al., 2012; Seifert et al., 2017). Diese könnte auch einen substantiellen Beitrag an der Identifikation alternativer Bewegungsabfolgen haben, wobei zu konstatieren ist, dass die Entscheidung des Strategiewechsels nach einem Fehlversuch, dessen Relevanz für die Boulderleistung in dem Fachartikel *Finding new creative solutions is a key component in world-class competitive bouldering* nachgewiesen wurde, nicht nur von visuellen Informationen, sondern insbesondere auch von dem kinästhetischen und taktilen Feedback abhängig sein könnte.

Darüber hinaus wurden eine Reihe von konditionellen Tests validiert. Der Ausgangspunkt stellte dabei die Testbatterie der International Rock Climbing Research Association (IRCRA) dar (International Rock Climbing Research Association, 2015), welche zu dem damaligen Zeitpunkt noch nicht validiert war. Grundsätzlich ähneln die Resultate der eigenen Vorstudie (Augste et al., 2020a) denen von Draper et al. (2021), sodass einzelne Tests modifiziert oder durch neu entwickelte Tests substituiert wurden. Die Neuentwicklung von konditionellen Tests war, basierend auf der Evaluation der IRCRA Testbatterie, vor allem für die Rumpfkraftausdauer notwendig. Eine Analyse des diesbezüglichen Forschungsstandes zeigte, dass, mit Ausnahme der Anzahl an Situps innerhalb 30 s für das Speedklettern (Krawczyk & Ozimek, 2014), sich die anderen verwendeten allgemeinen Rumpfkraftausdauer tests nicht zu dessen Diagnostik eignen (Grant et al., 2001; Grant et al., 1996; Laffaye et al., 2016; Macdonald & Callender, 2011).

Als Synthese aus den Schritten der Testauswahl und Entwicklung wurde ein Testmanual mit 14 Einzeltests erstellt (Augste et al., 2020b), welches die Grundlage für die Datenerhebung zur Bestimmung der empirisch-statistischen Leistungsrelevanz dieser Merkmale bildete.

In dem Bereich der Testentwicklung sind auch die auf eigenen Forschungsarbeiten basierenden Fachartikel *Optimization of an intermittent finger endurance test for climbers regarding gender and deviation in force and pulling time* und *Predictive value of forearm muscle oxygenation parameters for intermittent finger endurance and competitive climbing performance*) einzuordnen, auch wenn dessen Ergebnisse aufgrund der zeitlichen Reihenfolge der Untersuchungen nicht für die Erstellung der Leistungsstrukturmodelle verwendet werden konnten.

Das Forschungsdesiderat für den ersten Artikel wurde aus der hohen kletterspezifischen Relevanz der Fingerkraftausdauer sowie den uneinheitlichen Testkriterien für diese konkludiert (siehe Kapitel 4.3.1.3). Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem intermittierenden Fingerkraftausdauerterst (7:2 s, 60% MVC) die Anzahl der gültigen Wiederholungen basierend auf einer zulässigen zeitlichen Abweichung von 1 s von der intendierten Belastungszeit (7 s) und einer zulässigen Kraftabweichung von 9 % für die Frauen und 7 % für die Männer von der intendierten Belastungsintensität (60 % MVC) ermittelt werden sollte, da die Wiederholungsanzahl unter diesen Konfigurationen die höchste Korrelation mit der Kletterleistung aufwies.

In dem zweiten Fachartikel wurden zahlreiche NIRS-Parameter multifaktoriell hinsichtlich ihres prädiktiven Wertes für die Fingerkraftausdauer während eines intermittierenden Fingerkraftausdauertersts sowie eines simulierten Leadkletterwettkampfes analysiert. Während bei dem intermittierenden Fingerkraftausdauerterst durch diejenigen NIRS-Parameter, die eine hohe Oxygenierung und Desoxygenierung repräsentieren, 26.4 % der Varianz der erzielten Wiederholungen erklärt werden konnte, war hingegen für die Differenzierung zwischen den zeitlichen Intervallen des Kletterversuchs die Akkumulation der HHb-Konzentration der am besten geeignete Indikator.

- Für die Bestimmung der empirisch-statistisch leistungsrelevanten Merkmale, ist, neben der oben diskutierten Quantifizierung der unabhängigen Variablen, zudem eine Operationalisierung der abhängigen Variablen notwendig, welche anschließend diskutiert wird.

Da sich die vorliegende Arbeit mit der Leistungsdiagnostik im Wettkampfklettern befasst, wurde, ungleich wie in den meisten anderen Studien im Bouldern und Leadklettern, welche die SRCA oder die Kletterleistung als abhängige Variable verwendeten, in allen Disziplinen die Wettkampfleistung als abhängige Variable herangezogen. Für das Speedklettern erfolgte die Bestimmung der Wettkampfleistung auf Basis der erzielten Bestzeit, dessen Vergleichbarkeit durch die standardisierte Route gegeben ist und deren Erfassung durch die automatischen Zeiterfassungssysteme präzise und einfach möglich ist. Da im Bouldern und im Leadklettern die Wettkampfleistung nicht metrisch erfasst werden kann und keine übergreifenden Ranglisten existieren, wurde eine Rangliste basierend auf Wettkampfergebnissen zweier Jahre erstellt. Das Ranking basierte auf über die Wettkämpfe aggregierten Paarvergleichen der relativen Platzierung der Athleten. Dadurch konnte die abhängige Variable und somit die Leistungsstrukturmodelle für einen größeren Stichprobenumfang quantifiziert bzw. erstellt werden, als dies basierend auf den Ranglisten einzelner Wettkämpfe möglich gewesen wäre. Geringe Stichprobenumfänge stellen eine weitere, in diesem Zusammenhang diskutierte Problematik für die Erstellung von Leistungsstrukturmodellen dar (siehe Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns*). Das gewählte Vorgehen impliziert jedoch einen größeren zeitlichen Abstand zwischen der Diagnostik der unabhängigen Variablen und der Erfassung der abhängigen Variablen, welches eine der Limitationen des Fachartikels *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering and*

Lead Climbing darstellt. Der große zeitliche Abstand könnte dazu beigetragen haben, dass die Varianzaufklärung der meisten anderen multivariaten Studien (Baláš et al., 2012; Fryer et al., 2018; Ignjatović et al., 2016; MacKenzie et al., 2020; Magiera et al., 2013; Mermier et al., 2000; Ozimek, Krawczyk et al., 2017; Stanković et al., 2017) höher ausfällt wie bei den eigenen Leistungsstrukturmodellen, auch wenn eine ursächliche Zuschreibung darauf aufgrund des Einflusses vieler weiterer Faktoren nicht möglich ist.

Für die eigentliche statistische Bestimmung der leistungsrelevanten Merkmale kann nach Hohmann et al. (2020) auf 2 Kriterien zurückgegriffen werden, das varianzanalytische sowie das korrelationsstatistische Kriterium. Dabei ist jedoch nicht spezifiziert, ob die Vereinigungs- oder Schnittmenge beider Kriterien oder die Teilmenge eines der Kriterien verwendet werden sollte. Wie in dem Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns* beschrieben, wurde in den eigenen Forschungsarbeiten beide Kriterien angewendet und diejenigen abhängigen Variablen für weitere Auswertungszwecke herangezogen, welche sich basierend auf der Vereinigungsmenge als leistungsrelevant erwiesen. Für beide Kriterien wurde dabei die Wettkampfleistung als abhängige Variable verwendet.

Für zukünftige Studien wurde empfohlen, die genauen Auswahlverfahren der empirisch-statistisch leistungsrelevanten Merkmale auf Basis inhaltlich-logischer Entscheidungen zu treffen. Dennoch muss konstatiert werden, dass beide Kriterien unter Umständen verschiedene Konstrukte der sportlichen Leistung adressieren: Während das korrelationsstatistische Kriterium i.d.R. den Zusammenhang der Merkmale mit der Wettkampfleistung in Form des Rankings oder metrischen Werten überprüft, könnte das varianz-

analytische Kriterium hinsichtlich der Repräsentativität für die Wettkampfleistung problembehaftet sein. Dies ist insbesondere in Sportarten der Fall in denen kein etabliertes System zur Differenzierung zwischen wettkampfbezogenen Leistungsklassen existiert oder die im Leistungssportbereich nicht primär auf die Partizipation an Wettkämpfen ausgerichtet sind.

4. Basierend auf den identifizierten empirisch-statistische leistungsrelevanten Merkmalen wurde, entsprechend dem von Hohmann et al. (2020) beschriebenen Vorgehen zur Erstellung der Leistungsstrukturmodelle, die Reihenfolge der Merkmale basierend auf der Höhe der Korrelationskoeffizienten bestimmt. Der sogenannte Prioritätenkatalog wurde geschlechtsspezifisch für jede der Disziplinen erstellt (siehe Augste et al 2020a).

5.3 Interne Ordnung

Der abschließende Schritt des theoretischen Vorgehens zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen nach Hohmann et al. (2020) besteht in der Bestimmung der internen Ordnung.

Wie in dem ersten Schritt, der Modellbildung, beschrieben, wurden indeterministische, hierarchische Pyramidenmodelle als Grundmodell gewählt, auf Basis dessen die Leistungsstruktur empirisch modelliert wurde. Pyramidenmodelle strukturieren die sportliche Leistung in einer hierarchischen Ebenenstruktur: Die Basis bildet die sportliche Leistungsfähigkeit inklusive deren Leistungsvoraussetzungen, an der Spitze steht die Wettkampfleistung (siehe Kapitel 2.1.2). Die Bestimmung der internen Ordnung verfolgt nun das Ziel, ebenenimmanente, zusammenhängende Merkmalsgruppen zu identifizieren (horizontale interne Ordnung) sowie ebenenübergreifend die Beziehungen zwischen den Modell-ebenen zu modellieren (vertikale interne Ordnung) (Hohmann et al., 2020).

In den eigenen Forschungsarbeiten wurden zur statistischen Modellierung der internen Ordnung explorative, anstelle konfirmatorischer, Methoden verwendet. Dies liegt darin begründet, dass, wie auf Basis des Forschungsstands konkludiert wurde, es sich bei der vorliegenden Arbeit um die bislang einzige handelt, welche den relativen Einfluss unterschiedlicher Komponenten der sportlichen Leistung auf die Wettkampfleistung analysierte.

Zur Modellierung der internen Struktur werden, wie bereits in dem Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns* beschrieben, sportartübergreifend unterschiedliche statistische Methoden und Vorgehensweisen angewendet. Auch in den bisherigen multivariaten Studien im Klettern ist kein einheitliches Vorgehen zu erkennen: Baláš et al. (2012) verwendete ein Strukturgleichungsmodell, Magiera et al. (2013) die kanonische Korrelationsanalyse, Ignjatović et al. (2016) und Stanković et al. (2017) die kanonische Korrelationsanalyse sowie zusätzlich die multiple Regressionsanalyse, Ozimek, Krawczyk et al. (2017) und Fryer et al. (2018) die multiple Regressionsanalyse, mit der lediglich der relative Einfluss der Prädiktorvariablen auf die Kriteriums-

variable bestimmt werden kann ohne jedoch zusammenhängende Merkmalsgruppen im Sinne der horizontalen internen Struktur zu identifizieren, und Mermier et al. (2000), Laffaye et al. (2016) und MacKenzie et al. (2020) eine Hauptkomponentenanalyse in Verbindung mit einer auf den Faktorwerten basierten multiplen Regressionsanalyse. In eigenen Forschungsarbeiten wurde ebenfalls das zuletzt genannte Verfahren verwendet, insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass sowohl zusammenhängende Merkmalsgruppen identifiziert als auch deren relativer Einfluss auf die Wettkampfleistung bestimmt werden sollte.

Aus der Wahl des oben beschriebenen Verfahrens resultiert eine zweistufige Hierarchisierung – mit den Leistungsvoraussetzungen und -komponenten auf einer und der Kriteriumsvariable, der Wettkampfleistung, auf der darüber liegenden Ebene. Wie in dem Fachartikel *Leistungsstrukturanalyse im Praxischeck – Diskussion theoretischer Vorgaben und der praktischen Umsetzung am Beispiel des Sportkletterns* beschrieben, existieren, neben den nahezu ausschließlich zweistufigen multivariaten Modellen im Klettern auch in anderen Sportarten keine mehrstufigen Modellierungen im Sinne der Pyramidenmodelle, in denen die Merkmale einer unteren Ebene ausschließlich und in unumkehrbarer Beziehung über die Merkmale einer höheren Ebene wirksam werden. Ausgenommen davon sind Modelle, die die sportliche Zielleistung in mehrere Teilleistungen untergliedern. Eine derartige Untergliederung ist in den Combined-Formaten vorstellbar, auf die jedoch aufgrund der Bestrebung, langfristig die Einzeldisziplinen als olympische Sportarten zu etablieren, im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen wird. In den Einzeldisziplinen ist hingegen eine Untergliederung in Teilleistungen, welche auch wettkampfübergreifend bestand hat, aufgrund dem Nicht-Vorhandensein von permanenten, eindeutigen Abgrenzungskriterien zur Differenzierung zwischen Teilleistungen mit divergierenden Belastungs- und Anforderungsprofilen schwer möglich.

Die entwickelten Leistungsstrukturmodelle sind in dem Fachartikel *Competitive Performance Predictors in Speed Climbing, Bouldering and Lead Climbing* beinhaltet. Es ist jedoch zu konstatieren, dass diese zum einen leistungsniveauspezifisch sind sowie zum anderen, dass diese in zukünftigen Studien

durch die Weiterentwicklung des Sports oder die Einbeziehung weiterer leistungsrelevanter Merkmale anders ausfallen könnten.

5.4 Konklusion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine wissenschaftlich fundierte Leistungsdiagnostik im Sportklettern basierend auf dem von Hohmann et al. (2020) beschriebenen theoretischen Vorgehen zur Erstellung von Leistungsstrukturmodellen entwickelt. In mehreren Fachartikeln wurden die sich auf unterschiedliche Schritte dieses Vorgehens beziehende Forschungsdesiderate adressiert. Die Aggregation ihrer Erkenntnisse ermöglichte die Erstellung geschlechtsspezifische Leistungsstrukturmodelle für die Einzeldisziplinen Speed, Bouldern und Lead mit der Wettkampfleistung als abhängiger Variable. Kenntnisse über die Leistungsstruktur stellen die Basis für weitere trainingswissenschaftliche Anwendungsgebiete dar, insbesondere die Entwicklung evidenzbasierter Trainingsempfehlungen zur zielgerichteten und planmäßigen Manipulation der sportlichen Leistung. Darauf aufbauend können, im Sinne der trainingspraktischen Leistungsdiagnostik, durch den interindividuellen Vergleich nicht nur Stärken und Schwächen der einzelnen Sportler identifiziert werden, sondern auch durch den intraindividuellen Vergleich die individuelle Wirksamkeit des Trainings evaluiert und gesteuert werden.

Abkürzungsverzeichnis

BC	Boulderer
BF%	Körperfettanteil
BH	Körpergröße
BM	Körpergewicht
BMI	Body-Mass-Index
CMJ	Counter Movement Jump
CSAI	Competitive State Anxiety Scale
FDP	M. flexor digitorum profundus
FTI	Kraft-Zeitintegral
HF	Herzfrequenz
HF _{avg}	Durchschnittliche Herzfrequenz
HF _{max}	Maximale Herzfrequenz
HHb	Deoxyhämoglobin
LA _{post}	Im Anschluss an Kletterversuch gemessene Laktatkonzentration
LBM	Fettfreies Körpergewicht
LC	Leadkletterer
MM	Muskelmasse
MVC	Maximalkraft bei willkürlicher Kontraktion
NC	Nicht-Boulderer/Kletterer
OS	Onsight
O ₂ Hb	Oxyhämoglobin
PI	Ponderal Index
RFD _{peak}	Explosivkraft (Rate of force development)
RI	Rohrer's Index
RP	Rotpunkt
SA	Somatische Angst
SRCA	Selbst eingeschätzte Kletterfähigkeit
STAI	State Trait Anxiety Inventory
TSI	Sauerstoffsättigungsindex (Tissue Saturation Index)
TTF	Zeit bis Testabbruch
T _{1/2}	Time-To-Half-Recovery
VO ₂	Sauerstoffaufnahme
VO _{2avg}	Durchschnittliche Sauerstoffaufnahme
VO _{2max}	Maximale Sauerstoffaufnahme
VO _{2peak}	Höchste gemessene Sauerstoffaufnahme
ΔtF _{peak}	Zeitdifferenz vom Beginn des Kraftanstiegs bis zum Erreichen der Maximalkraft
Δt0,5F _{peak}	Zeitdifferenz vom Beginn des Kraftanstiegs bis zum Erreichen der Hälfte der Maximalkraft
1 RM	Einerwiederholungsmaximum

Literaturverzeichnis

- Aras, D., & Akalan, C. (2014). The effect of anxiety about falling on selected physiological parameters with different rope protocols in sport rock climbing. *The Journal of Sports Medicine and physical fitness*, 54(1), 1-8.
- Arbulu, A., Usabiaga, O., & Castellano, J. (2015). A time motion analysis of lead climbing in the 2012 men's and women's world championship finals. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 15(3), 924-934. <https://doi.org/10.1080/24748668.2015.11868841>
- Aşçi, F. H., Demirhan, G., Koca, C., & Dinç, S. C. (2006). Precompetitive anxiety and affective state of climbers in indoor climbing competition. *Perceptual and motor skills*, 102(2), 395-404. <https://doi.org/10.2466/pms.102.2.395-404>
- Augste, C., & Künzell, S. (2017). Welche Eigenschaften zeichnen einen Spitzenkletterer aus? Ergebnisse aus Interviews mit Leistungstrainern. *Leistungssport*, 47(4), 49–55.
- Augste, C., Winkler, M., & Künzell, S. (2020a). *Entwicklung einer wissenschaftlich fundierten Leistungsdiagnostik im Sportklettern: Projektbericht [online]*. Universität Augsburg. <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-766056>
- Augste, C., Winkler, M., & Künzell, S. (2020b). *Leistungsdiagnostik im Sportklettern - Testmanual [online]*. Universität Augsburg. <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-761415>
- Augustsson, S. R., Frodi-Lundgren, A., & Svantesson, U. (2018). Elbow Strength Profiles and Performance Level in Swedish Climbers. *Journal of Physical Medicine, Rehabilitation and Disabilities*, 4, 1-7. <https://doi.org/10.24966/pmr-8670/100026>
- Baláš, J., Gajdošík, J., Giles, D., Fryer, S., Krupková, D., Brtník, T., & Feldmann, A. (2021). Isolated finger flexor vs. exhaustive whole-body climbing tests? How to assess endurance in sport climbers? *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 121(5), 1337-1348. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04595-7>
- Baláš, J., Gajdošík, J., Krupková, D., Chrastinová, L., Hlaváčková, A., Bačáková, R., & Giles, D. (2021). Psychophysiological responses to treadwall and indoor wall climbing in adult female climbers. *Scientific Reports*, 11(1), 1-8.
- Baláš, J., Panáčková, M., Jandová, S., Martin, A. J., Strejcová, B., Vomáčko, L., Charousek, J., Cochrane, D. J., Hamlin, M., & Draper, N. (2014). The effect of climbing ability and slope inclination on vertical foot loading using a novel force sensor instrumentation system. *Journal of Human Kinetics*, 44, 75-81. <https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0112>

- Baláš, J., Panáčková, M., Strejcová, B., Martin, A. J., Cochrane, D. J., Kaláb, M., Kodejška, J., & Draper, N. (2014). The Relationship between Climbing Ability and Physiological Responses to Rock Climbing. *The Scientific World Journal*, 2014(2), 1-6. <https://doi.org/10.1155/2014/678387>
- Baláš, J., Pecha, O., Martin, A. J., & Cochrane, D. (2012). Hand–arm strength and endurance as predictors of climbing performance. *European Journal of Sport Science*, 12(1), 16-25. <https://doi.org/10.1080/17461391.2010.546431>
- Bauersfeld, K.H. & Schröter, G. (1979). *Grundlagen der Leichtathletik*. Sportverlag.
- Bazancir, Z., Beydagi, M. G., & Talu, B. (2018). Effect of Different Pre-Competition Anxiety and Self-Confidence on the Performance in Bouldering Climbers. *Gaziantep Üniversitesi Spor Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1-9.
- Bergua, P., Montero-Marin, J., Gomez-Bruton, A., & Casajús, J. A. (2018). Hanging ability in climbing: an approach by finger hangs on adjusted depth edges in advanced and elite sport climbers. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18(3), 437-450.
- Bergua-Gómez, P., Gomez-Bruton, A., Casajús, J., & Montero-Marin, J. (2022). A new performance threshold in sport climbing: A change in how climbing trainers work? *Science & Sports*, 37(7), 656-658.
- Bertuzzi, R., Franchini, E., Tricoli, V., Lima-Silva, A. E., Pires, F. O., Okuno, N. M., & Kiss, M. A. (2012). Fit-climbing test: A field test for indoor rock climbing. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(6), 1558-1563. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318231ab37>
- Bertuzzi, R. C. d. M., Franchini, E., Kokubun, E., & Kiss, M. A. P. D. M. (2007). Energy system contributions in indoor rock climbing. *European Journal of Applied Physiology*, 101(3), 293-300. <https://doi.org/10.1007/s00421-007-0501-0>
- Billat, V., Palleja, P., Charlaix, T., Rizzardo, P., & Janel, N. (1995). Energy specificity of rock climbing and aerobic capacity in competitive sport rock climbers. *The Journal of Sports Medicine and physical fitness*, 35(1), 20-24.
- Booth, J., Marino, F., Hill, C., & Gwinn, T. (1999). Energy cost of sport rock climbing in elite performers. *British Journal of Sports Medicine*, 33(1), 14-18. <https://doi.org/10.1136/bjism.33.1.14>
- Boschker, M. S. J., Bakker, F. C., & Michaels, C. F. (2002). Memory for the functional characteristics of climbing walls: Perceiving affordances. *Journal of Motor Behavior*, 34(1), 25-36.

- Bourne, R., Halaki, M., Vanwanseele, B., & Clarke, J. (2011). Measuring Lifting Forces in Rock Climbing: Effect of Hold Size and Fingertip Structure. *Journal of Applied Biomechanics*, 27(1), 40-46. <https://doi.org/10.1123/jab.27.1.40>
- Brent, S., Draper, N., Hodgson, C., & Blackwell, G. (2009). Development of a performance assessment tool for rock climbers. *European Journal of Sport Science*, 9(3), 159-167. <https://doi.org/10.1080/17461390902741132>
- Cross, A. J. (2017). *A Comparison of Two Sport-Climbing Specific Aerobic Power Protocols and Their Relationship to Sport-Climbing Ability* [Dissertation]. University of Colorado Boulder.
- Cutis, A., & Bollen, S. R. (1993). Grip Strength and Endurance in Rock Climbers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 207(2), 87-92. https://doi.org/10.1243/pime_proc_1993_207_275_02
- de Geus, B., Villanueva O'Driscoll, S., & Meeusen, R. (2006). Influence of climbing style on physiological responses during indoor rock climbing on routes with the same difficulty. *European Journal of Applied Physiology*, 98(5), 489-496.
- Deyhle, M. R., Hsu, H.-S., Fairfield, T. J., Cadez-Schmidt, T. L., Gurney, B. A., & Mermier, C. M. (2015). Relative Importance of Four Muscle Groups for Indoor Rock Climbing Performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(7), 2006-2014. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000823>
- Dickson, T., Fryer, S., Blackwell, G., Draper, N., & Stoner, L. (2012). Effect of style of ascent on the psychophysiological demands of rock climbing in elite level climbers. *Sports Technology*, 5(3-4), 111-119.
- Donath, L., Roesner, K., Schöffl, V., & Gabriel, H. H. W. (2013). Work-relief ratios and imbalances of load application in sport climbing: another link to overuse-induced injuries? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(4), 406-414. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01399.x>
- Došla, J., & Meško, J. (2016). The influence of strength abilities on sports performance in climbing. *Journal of Human Sport and Exercise*, 11(Proc1). <https://doi.org/10.14198/jhse.2016.11.Proc1.06>
- Draper, N., Dickson, T., Blackwell, G., Fryer, S., Priestley, S., Winter, D., & Ellis, G. (2011). Self-reported ability assessment in rock climbing. *Journal of Sports Sciences*, 29(8), 851-858. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.565362>
- Draper, N., Dickson, T., Blackwell, G., Priestley, S., Fryer, S., Marshall, H., Shearman, J., Hamlin, M., Winter, D., & Ellis, G. (2011). Sport-specific

- power assessment for rock climbing. *Journal of sports medicine and physical fitness*, 51(3), 417.
- Draper, N., Dickson, T., Fryer, S., & Blackwell, G. (2011). Performance differences for intermediate rock climbers who successfully and unsuccessfully attempted an indoor sport climbing route. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 11(3), 450-463.
- Draper, N., Giles, D., Schöffl, V., Fuss, F. K., Watts, P., Wolf, P., Baláš, J., Espana-Romero, V., Blunt Gonzalez, G., & Fryer, S. (2015). Comparative grading scales, statistical analyses, climber descriptors and ability grouping: International Rock Climbing Research Association Position Statement. *Sports Technology*, 8(3-4), 88-94.
- Draper, N., Giles, D., Taylor, N., Vigouroux, L., España-Romero, V., Baláš, J., Altamirano, I. S., Mally, F., Beeretz, I., & Canalejo, J. C. (2021). Performance assessment for rock climbers: the International Rock Climbing Research Association sport-specific test battery. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(9), 1242-1252.
- Draper, N., Jones, G. A., Fryer, S., Hodgson, C., & Blackwell, G. (2008). Effect of an on-sight lead on the physiological and psychological responses to rock climbing. *Journal of Sports Science & Medicine*, 7(4), 492.
- Draper, N., Jones, G. A., Fryer, S., Hodgson, C. I., & Blackwell, G. (2010). Physiological and psychological responses to lead and top rope climbing for intermediate rock climbers. *European Journal of Sport Science*, 10(1), 13-20.
- Ehlenz, H., Grosser, M. & Zimmermann, E. (1985). *Krafttraining* (2. Aufl.). BLV.
- España-Romero, V., Ortega Porcel, F. B., Artero, E. G., Jiménez-Pavón, D., Gutiérrez Sainz, A., Castillo Garzón, M. J., & Ruiz, J. R. (2009). Climbing time to exhaustion is a determinant of climbing performance in high-level sport climbers. *European Journal of Applied Physiology*, 107(5), 517-525. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1155-x>
- Esposito, F., Limonta, E., Cè, E., Gobbo, M., Veicsteinas, A., & Orizio, C. (2009). Electrical and mechanical response of finger flexor muscles during voluntary isometric contractions in elite rock-climbers. *European Journal of Applied Physiology*, 105(1), 81-92. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0877-5>
- Fanchini, M., Violette, F., Impellizzeri, F. M., & Maffiuletti, N. A. (2013). Differences in Climbing-Specific Strength Between Boulder and Lead Rock Climbers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(2), 310-314. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182577026>
- Ferguson, R. A., & Brown, M. D. (1997). Arterial blood pressure and forearm vascular conductance responses to sustained and rhythmic isometric exercise and arterial occlusion in trained rock climbers and untrained

- sedentary subjects. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 76(2), 174-180. <https://doi.org/10.1007/s004210050231>
- Ferrara III, P. F. (2018). *Change in finger force production and muscle activation in the forearms of rock climbers during treadwall climbing* [Dissertation]. Montana State University-Bozeman, College of Education, Health & Human Development.
- Fryer, S., Dickson, T., Draper, N., Blackwell, G., & Hillier, S. (2012). A psychophysiological comparison of on-sight lead and top rope ascents in advanced rock climbers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 23(5), 645-650. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01432.x>
- Fryer, S., Draper, N., Dickson, T., Blackwell, G., Winter, D., & Ellis, G. (2011). Comparison of lactate sampling sites for rock climbing. *International Journal of Sports Medicine*, 32(06), 428-432.
- Fryer, S., Dickson, T., Draper, N., Eltom, M., Stoner, L., & Blackwell, G. (2012). The effect of technique and ability on the VO₂ –heart rate relationship in rock climbing. *Sports Technology*, 5(3-4), 143-150. <https://doi.org/10.1080/19346182.2012.755538>
- Fryer, S., Giles, D., Palomino, I. G., de la O Puerta, A., & España-Romero, V. (2018). Hemodynamic and cardiorespiratory predictors of sport rock climbing performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(12), 3534-3541.
- Fryer, S., Stone, K. J., Sveen, J., Dickson, T., España-Romero, V., Giles, D., Baláš, J., Stoner, L., & Draper, N. (2017). Differences in forearm strength, endurance, and hemodynamic kinetics between male boulderers and lead rock climbers. *European Journal of Sport Science*, 17(9), 1177-1183. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1353135>
- Fryer, S., Stoner, L., Dickson, T., Draper, S. B., McCluskey, M. J., Hughes, J. D., How, S. C., & Draper, N. (2015). Oxygen recovery kinetics in the forearm flexors of multiple ability groups of rock climbers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(6), 1633-1639. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000804>
- Fryer, S., Stoner, L., Scarrott, C., Lucero, A., Witter, T., Love, R., Dickson, T., & Draper, N. (2015). Forearm oxygenation and blood flow kinetics during a sustained contraction in multiple ability groups of rock climbers. *Journal of Sports Sciences*, 33(5), 518-526. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.949828>
- Fryer, S., Stoner, L., Stone, K., Giles, D., Sveen, J., Garrido, I., & España-Romero, V. (2016). Forearm muscle oxidative capacity index predicts sport rock-climbing performance. *European Journal of Applied Physiology*, 116(8), 1479-1484. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3403-1>

- Fuss, F. K., & Niegl, G. (2006). Dynamics of speed climbing. In E. F. Moritz & S. Haake (Hrsg.), *The engineering of sport 6* (S. 51-56). Springer.
- Fuss, F. K., & Niegl, G. (2008). Instrumented climbing holds and performance analysis in sport climbing. *Sports Technology*, 1(6), 301-313. <https://doi.org/10.1002/jst.71>
- Fuss, F. K., & Niegl, G. (2010). Instrumented climbing holds and dynamics of sport climbing. In E. F. Moritz & S. Haake (Hrsg.) *The Engineering of Sport 6: Volume 1: Developments for Sports* (S. 57-62). Springer.
- Gajewski, J., Hübner-Woźniak, E., Tomaszewski, P., & Sienkiewicz-Dianzenza, E. (2009). Changes in handgrip force and blood lactate as response to simulated climbing competition. *Biology of Sport*, 26(1), 13-21. <https://doi.org/10.5604/20831862.890171>
- Garrido-Palomino, I., & España-Romero, V. (2019). Role of emotional intelligence on rock climbing performance. *Revista internacional de ciencias del deporte*, 15(57), 284-294. <https://doi.org/10.5232/ricyde2019.05706>
- Garrido-Palomino, I., Fryer, S., Giles, D., González-Rosa, J. J., & España-Romero, V. (2020). Attentional differences as a function of rock climbing performance. *Frontiers in Psychology*, 11, 1550. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01550>
- Çaşior, P. (2020). Kinesthetic differentiation, kinematic and dynamic parameters in sports climbing competitors of varying ability levels. *Journal of Kinesiology and Exercise Sciences*, 30(92), 19-27. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.8209>
- Gáspari, A. F., Berton, R., Lixandrão, M. E., Perlotti Piunti, R., Chacon-Mikahil, M. P. T., & Bertuzzi, R. (2015). The blood lactate concentration responses in a real indoor sport climbing competition. *Science & Sports*, 30(4), 228-231. <https://doi.org/10.1016/j.scispo.2015.05.002>
- Giles, D., Barnes, K., Taylor, N., Chidley, C., Chidley, J., Mitchell, J., Torr, O., Gibson-Smith, E., & España-Romero, V. (2021). Anthropometry and performance characteristics of recreational advanced to elite female rock climbers. *Journal of Sports Sciences*, 39(1), 48-56. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1804784>
- Giles, D., Draper, N., Gilliver, P., Taylor, N., Mitchell, J., Birch, L., Woodhead, J., Blackwell, G., & Hamlin, M. J. (2014). Current understanding in climbing psychophysiology research. *Sports Technology*, 7(3-4), 108-119.
- Giles, D., Hartley, C., Maslen, H., Hadley, J., Taylor, N., Torr, O., Chidley, J., Randall, T., & Fryer, S. (2021). An All-Out Test to Determine Finger Flexor Critical Force in Rock Climbers. *International Journal of Sports*

- Physiology and Performance*, 16(7), 942-949.
<https://doi.org/10.1123/ijssp.2020-0637>
- Giles, S. & Brandenburg, J. (2016). Physiology of Climbing. In L. Seifert, P. Wolf & A. Schweizer (Hrsg.) *The Science of Climbing and Mountaineering* (S. 17-47). Taylor and Francis.
- Ginszt, M., Michalak-Wojnowska, M., Gawda, P., Wojcierowska-Litwin, M., Korszeń-Pilecka, I., Kusztelak, M., Muda, R., Filip, A. A., & Majcher, P. (2018). ACTN3 Genotype in Professional Sport Climbers. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(5), 1311-1315.
<https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000002457>
- Glazier, P. (2015). Towards a Grand Unified Theory of sports performance. *Human Movement Science*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.01>
- Grant, S., Hasler, T., Davies, C., Aitchison, T. C., Wilson, J., & Whittaker, A. (2001). A comparison of the anthropometric, strength, endurance and flexibility characteristics of female elite and recreational climbers and non-climbers. *Journal of Sports Sciences*, 19(7), 499-505.
<https://doi.org/10.1080/026404101750238953>
- Grant, S., Hynes, V., Whittaker, A., & Aitchison, T. (1996). Anthropometric, strength, endurance and flexibility characteristics of elite and recreational climbers. *Journal of Sports Sciences*, 14(4), 301-309.
<https://doi.org/10.1080/02640419608727715>
- Grant, S., Shields, C., Fitzpatrick, V., Loh, W. M., Whitaker, A., Watt, I., & Kay, J. W. (2003). Climbing-specific finger endurance: a comparative study of intermediate rock climbers, rowers and aerobically trained individuals. *Journal of Sports Sciences*, 21(8), 621-630.
<https://doi.org/10.1080/0264041031000101953>
- Grosser, M., Starischka, S. & Zimmermann, E. (2004). *Das neue Konditions-training*. BLV.
- Heilmann, F. (2021). Executive Functions and Domain-Specific Cognitive Skills in Climbers. *Brain sciences*, 11(4), 449.
<https://doi.org/10.3390/brainsci11040449>
- Hohmann, A., Lames, M., Letzelter, M., & Pfeiffer, M. (2020). *Einführung in die Trainingswissenschaft* (7., überarb. Aufl.). Limpert.
- Ignjatović, M., Stanković, D., & Pavlović, V. (2016). Relations and influences of balance on the result in sports climbing. *Facta Universitatis, Series: Physical Education and Sport*, 237-245.
- International Federation of Sport Climbing [IFSC]. (2018, April). *Rules 2018. Version 1.5*. https://cdn.ifsc-climbing.org/images/World_Competitions/IFSC-Rules_2018_V15.pdf

- International Federation of Sport Climbing [IFSC]. (2021, Mai). *2021 Rules: Version 1.7.6*. https://cdn.ifsc-climbing.org/images/World_Competitions/2021_IFSC_Rules_v176_.pdf
- International Federation of Sports Climbing [IFSC]. (2022). *Speed records*. Abgerufen am 07. Januar 2023 unter <https://www.ifsc-climbing.org/index.php/world-competition/speed-records>
- International Rock Climbing Research Association [IRCRA]. (2015, 18. November). *The IRCRA performance-related test battery for climbers. Test manual-Version 1.6*. https://www.ircra.rocks/_files/ugd/441095_3f6fbf247bc4481b8f4c793479aea48f.docx
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of chiropractic medicine, 15*(2), 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
- Krawczyk, M., & Ozimek, M. (2014). Somatic traits and motor skill abilities in top-class professional speed climbers compared to recreational climbers. *Antropomotoryka. Journal of Kynesiology and Exercise Science, 66*(24), 25-32.
- Krawczyk, M., Ozimek, M., Rokowski, R., Pocięcha, M., & Draga, P. (2018). Anthropometric characteristics and anaerobic power of lower limbs and their relationship with race time in female speed climbers. *SOCIETY. INTEGRATION. EDUCATION. Proceedings of the International Scientific Conference, 4*, 118-126. <https://doi.org/10.17770/sie2018vol1.3268>
- Krawczyk, M., Ozimek, M., Rokowski, R., Pocięcha, M., & Draga, P. (2019). The Significance of Selected Tests Characterizing Motor Potential in Achieving High Results in Speed Climbing. *Antropomotoryka. Journal of Kynesiology and Exercise Science, 29*(88), 63-72.
- Krawczyk, M., Pocięcha, M., Ozimek, M., & Draga, P. (2020). The force, velocity, and power of the lower limbs as determinants of speed climbing efficiency. *Trends in Sport Sciences, 27*(4), 219-224.
- Krawczyk, M., Pocięcha, M., Sordyl, T., Stepek, A., & Kozioł, P. (2021). Predicting performance in speed climbing: accuracy of the force-velocity test on a cycle ergometer. *SOCIETY. INTEGRATION. EDUCATION. Proceedings of the International Scientific Conference, 4*(0), 392-398. <https://doi.org/10.17770/sie2021vol4.6294>
- La Torre, A., Crespi, D., Serpiello, F. R., & Merati, G. (2009). Heart rate and blood lactate evaluation in bouldering elite athletes. *The Journal of Sports Medicine and physical fitness, 49*(1), 19-24.
- Labott, B. K., Held, S., & Donath, L. (2020). Grip Strength-Endurance in Ambitious and Recreational Climbers: Does the Strength Decrement

- Index Serve as a Feasible Measure? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9530.
- Laffaye, G., Collin, J.-M., Levernier, G., & Padulo, J. (2014). Upper-limb Power Test in Rock-climbing. *International Journal of Sports Medicine*, 35, 670-675. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1358473>
- Laffaye, G., Levernier, G., & Collin, J.-M. (2016). Determinant factors in climbing ability: Influence of strength, anthropometry, and neuromuscular fatigue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(10), 1151-1159. <https://doi.org/10.1111/sms.12558>
- Lechner, B., Filzwieser, I., Lieschnedd, M., & Sammer, P. (2013). A climbing hold with an integrated three dimensional force measurement and wireless data acquisition. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 6(5), 2296.
- Levernier, G., & Laffaye, G. (2021). Rate of force development and maximal force: reliability and difference between non-climbers, skilled and international climbers. *Sports biomechanics*, 20(4), 495-506.
- Limonta, E., Cè, E., Gobbo, M., Veicsteinas, A., Orizio, C., & Esposito, F. (2015). Motor unit activation strategy during a sustained isometric contraction of finger flexor muscles in elite climbers. *Journal of Sports Sciences*, 34(2), 133-142. <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1035738>
- Limonta, E., Fanchini, M., Rampichini, S., Cé, E., Longo, S., Coratella, G., & Esposito, F. (2020). On-sight and red-point climbing: Changes in performance and route-finding ability in male advanced climbers. *Frontiers in Psychology*, 11, 902.
- López Laval, I., & Sitko, S. (2019). Factores de Rendimiento en Escalada Deportiva y Escalada En Bloque: Revisión Sistemática. *Revista de Entrenamiento Deportivo*, 33(3), 1-10.
- López-Rivera, E. (2014). *Efectos de diferentes métodos de entramiento de fuerza y resistencia de agarre en escaladores deportivos de distintos niveles* [Dissertation]. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Macdonald, J. H., & Callender, N. (2011). Athletic Profile of Highly Accomplished Boulderers. *Wilderness & Environmental Medicine*, 22(2), 140-143. <https://doi.org/10.1016/j.wem.2010.11.012>
- Macias, K., Brown, L., Coburn, J., & Chen, D. (2015). A Comparison of Upper Body Strength between Rock Climbing and Resistance Trained Men. *Sports*, 3(3), 178-187. <https://doi.org/10.3390/sports3030178>
- Maciejczyk, M., Michailov, M. L., Wiecek, M., Szymura, J., Rokowski, R., Szygula, Z., & Beneke, R. (2022). Climbing-specific exercise tests:

- Energy system contributions and relationships with sport performance. *Frontiers in Physiology*, 12, 2521.
- MacKenzie, R., Monaghan, L., Masson, R. A., Werner, A. K., Caprez, T. S., Johnston, L., & Kemi, O. J. (2020). Physical and Physiological Determinants of Rock Climbing. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(2), 168-179. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0901>
- MacLeod, D., Sutherland, D. L., Buntin, L., Whitaker, A., Aitchison, T., Watt, I., Bradley, J., & Grant, S. (2007). Physiological determinants of climbing-specific finger endurance and sport rock climbing performance. *Journal of Sports Sciences*, 25(12), 1433-1443. <https://doi.org/10.1080/02640410600944550>
- Magalhães, J., Ferreira, R., Marques, F., Olivera, E., Soares, J., & Ascensao, A. (2007). Indoor climbing elicits plasma oxidative stress. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(6), 955-963.
- Magiera, A., Rocznik, R., Maszczyk, A., Czuba, M., Kantyka, J., & Kurek, P. (2013). The Structure of Performance of a Sport Rock Climber. *Journal of Human Kinetics*, 36(1), 107-117. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0011>
- Marcolin, G., Faggian, S., Muschietti, M., Matteraglia, L., & Paoli, A. (2022). Determinants of climbing performance: When finger flexor strength and endurance count. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 36(4), 1099-1104.
- Marsala, M. (2019). *Ultrasound Measured Flexor Muscle Thickness in the Forearms of Rock Climbers* [Masters Thesis]. University of Central Florida.
- Martin, D. (1980). *Grundlagen der Trainingslehre. Teil 2: Die Steuerung der Trainingsprozesses*. Hofmann.
- McMoris, T., Tomporowski, P.D. & Audiffren, M. (2009). *Exercise and cognitive function*. Wiley.
- Medernach, J. P., Kleinöder, H., & Lötzerich, H. H. H. (2016). Movement demands of elite female and male athletes in competitive bouldering. *Journal of Physical Education and Sport*, 16(03), 836. <https://doi.org/10.7752/jpes.2016.03132>
- Medernach, J. P., & Memmert, D. (2021). Effects of decision-making on indoor bouldering performances: A multi-experimental study approach. *PLoS one*, 16(5), e0250701. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250701>
- Mermier, C. M. (2000). Physiological and anthropometric determinants of sport climbing performance. *British Journal of Sports Medicine*, 34(5), 359-365. <https://doi.org/10.1136/bjbm.34.5.359>

- Mermier, C. M., Janot, J. M., Parker, D. L., & Swan, J. G. (2000). Physiological and anthropometric determinants of sport climbing performance. *British Journal of Sports Medicine*, *34*(5), 359-365.
- Mermier, C. M., Robergs, R. A., McMinn, S. M., & Heyward, V. H. (1997). Energy expenditure and physiological responses during indoor rock climbing. *British Journal of Sports Medicine*, *31*(3), 224-228. <https://doi.org/10.1136/bjism.31.3.224>
- Michailov, M. L., Baláš, J., Tanev, S. K., Andonov, H. S., Kodejška, J., & Brown, L. (2018). Reliability and Validity of Finger Strength and Endurance Measurements in Rock Climbing. *Research quarterly for exercise and sport*, *89*(2), 246-254. <https://doi.org/10.1080/02701367.2018.1441484>
- Michailov, M. L., Morrison, A., Kettenliev, M. M., & Pentcheva, B. P. (2015). A Sport-Specific Upper-Body Ergometer Test for Evaluating Submaximal and Maximal Parameters in Elite Rock Climbers. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *10*, 374-380. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2014-0160>
- Michailov, M. L., Rokowski, R., Ręgwelski, T., Staszkiwicz, R., Brown, L. E., & Szygula, Z. (2017). Physiological responses during two climbing tests with different hold types. *International Journal of Sports Science & Coaching*, *12*(2), 276-283.
- Mladenov, L. V., Mihailov, M. L., & Schoffl, V. R. (2009). Anthropometric and strength characteristics of world-class boulderers. *Medicina Sportiva*, *13*(4), 231-238.
- Noé, F., Quaine, F., & Martin, L. (2001). Influence of steep gradient supporting walls in rock climbing: biomechanical analysis. *Gait & Posture*, *13*(2), 86-94.
- Ozimek, M., Krawczyk, M., Rokowski, R., Draga, P., Ambroży, T., Mucha, D., Omorczyk, J., Stanula, A., Pocięcha, M., & Görner, K. (2018). Evaluation of the level of anaerobic power and its effect on speed climbing performance in elite climbers. *Trends in Sport Sciences*, *3*(25), 149-158.
- Ozimek, M., Krawczyk, M., Zadarko, E., Barabasz, Z., Ambroży, T., Stanula, A., Mucha, D. K., Jurczak, A., & Mucha, D. (2017). Somatic Profile of the Elite Boulderers in Poland. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*(4), 963-970. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000001673>
- Ozimek, M., Rokowski, R., Draga, P., Ljakh, V., Ambroży, T., Krawczyk, M., Ręgwelski, T., Stanula, A., Görner, K., Jurczak, A., & Mucha, D. (2017). The role of physique, strength and endurance in the achievements of elite climbers. *PloS one*, *12*(8), e0182026. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182026>

- Ozimek, M., Staszkiwicz, R., Rokowski, R., & Stanula, A. (2016). Analysis of Tests Evaluating Sport Climbers' Strength and Isometric Endurance. *Journal of Human Kinetics*, 53(1), 249-260. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0027>
- Pezzulo, G., Barca, L., Bocconi, A. L., & Borghi, A. M. (2010). When affordances climb into your mind: Advantages of motor simulation in a memory task performed by novice and expert rock climbers. *Brain and Cognition*, 73(1), 68-73.
- Philippe, M., Wegst, D., Müller, T., Raschner, C., & Burtscher, M. (2012). Climbing-specific finger flexor performance and forearm muscle oxygenation in elite male and female sport climbers. *European Journal of Applied Physiology*, 112(8), 2839-2847. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2260-1>
- Przeliorz-Pyszczyk, A., Gołębek, K., & Regulaska-Ilow, B. (2019). Evaluation of the relationship of the climbing level of sport climbers with selected anthropometric indicators and diet composition. *Central European Journal of Sport Sciences and Medicine*, 28(4), 15-26.
- Quaine, F., Vigouroux, L., & Martin, L. (2003). Finger flexors fatigue in trained rock climbers and untrained sedentary subjects. *International Journal of Sports Medicine*, 24(6), 424-427. <https://doi.org/10.1055/s-2003-41174>
- Rhea, M. R., Hunter, R. L., & Hunter, T. J. (2006). Competition modeling of American football: observational data and implications for high school, collegiate, and professional player conditioning. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 58-61. <https://doi.org/10.1519/00124278-200602000-00010>
- Richmond, S. R., Mitchell, R. T., Altena, T. S., & Gibson, H. M. (2017). Determining the Impact of Anthropometric Factors on Rock Climbing Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(5S), 967. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000519641.97149.03>
- Rokowski, R., Michailov, M., Maciejczyk, M., Więcek, M., Szymura, J., Draga, P., Trendafilov, P., & Szygula, Z. (2021). Muscle strength and endurance in high-level rock climbers. *Sports biomechanics*, 1-16.
- Rosponi, A., Schena, F., Leonardi, A., & Tosi, P. (2012). Influence of ascent speed on rock climbing economy. *Sport sciences for health*, 7(2), 71-80.
- Sanchez, X., Boschker, M., & Llewellyn, D. (2010). Pre-performance psychological states and performance in an elite climbing competition. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20(2), 356-363.
- Sanchez, X., Lambert, P., Jones, G., & Llewellyn, D. (2012). Efficacy of pre-ascent climbing route visual inspection in indoor sport climbing. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 22(1), 67-72.

- Sanchez, X., Lambert, P., Jones, G., & Llewellyn, D. J. (2012). Efficacy of pre-ascent climbing route visual inspection in indoor sport climbing. *Scand J Med Sci Sports*, 22(1), 67-72.
- Sanchez, X., Torregrossa, M., Woodman, T., Jones, G., & Llewellyn, D. J. (2019). Identification of Parameters That Predict Sport Climbing Performance. *Frontiers in Psychology*, 10, 1294. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01294>
- Saul, D., Steinmetz, G., Lehmann, W., & Schilling, A. F. (2019). Determinants for Success in Climbing: A Systematic Review. *Journal of exercise science and fitness*, 17(3), 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2019.04.002>
- Schädle-Schardt, W. (1998). Die zeitliche Gestaltung von Belastung und Entlastung im Wettkampfklettern als Element der Trainingssteuerung. *Leistungssport*, 28(1), 23-28.
- Schienkiewitz, A., Kuhnert, R., Blume, M., & Mensink, G. (2022). Overweight and obesity among adults in Germany-Results from GEDA 2019/2020-EHIS. *Journal of Health Monitoring*, 7(3), 21-28.
- Schmidt, H. (2005). *Modelle, komplexe Systeme und Möglichkeiten von Zeitreihenanalysen zur sportlichen Leistungsoptimierung-theoretische und empirische Untersuchungen* [Dissertation]. Technische Universität Dortmund.
- Schnabel, G.T., Harre, D., Krug., J. & Borde, A. (1994). *Trainingswissenschaft. Leistung - Training - Wettkampf*. Der Sportverlag Berlin.
- Schöffl, I., Wüstenfeld, J., Jones, G., Dittrich, S., Lutter, C., & Schöffl, V. (2020). *Cardiopulmonary exercise tests of adolescent elite sport climbers—a comparison of the German junior national team in sport climbing and nordic skiing*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-26996/v1>
- Seifert, L., Cordier, R., Orth, D., Courtine, Y., & Croft, J. L. (2017). Role of route previewing strategies on climbing fluency and exploratory movements. *PloS one*, 12(4), e0176306.
- Seifert, L., Hacques, G., Rivet, R., & Legreneur, P. (2020). Assessment of fluency dynamics in climbing. *Sports biomechanics*, 1-12.
- Sheel, A. W., Seddon, N., Knight, A., Mckenzie, D. C., & R Warburton, D. E. (2003). Physiological responses to indoor rock-climbing and their relationship to maximal cycle ergometry. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(7), 1225-1231. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000074443.17247.05>
- Sherk, V. D., Sherk, K. A., Kim, S., Young, K. C., & Bemben, D. A. (2011). Hormone responses to a continuous bout of rock climbing in men.

- European Journal of Applied Physiology*, 111(4), 687-693.
<https://doi.org/10.1007/s00421-010-1685-2>
- Stanković, D., Pavlović, V., & Petković, E. (2017). The influence of coordination on the results in sports climbing: the underlying relations. *Facta universitatis series physical education and sport*, 21-26.
- Staszkiwicz, R., Rokowski, R., Michailov, M. L., Ręgwelski, T., & Szyguła, Z. (2018). Biomechanical Profile of the Muscles of the Upper Limbs in Sport Climbers. *Polish Journal of Sport and Tourism*, 25(1), 10.
- Stefan, R. R., Camic, C. L., Miles, G. F., Kovacs, A. J., Jagim, A. R., & Hill, C. M. (2022). Relative Contributions of Handgrip and Individual Finger Strength on Climbing Performance in a Bouldering Competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(5), 768-773.
- Sterkowicz, S., Jaworski, J., & Rokowski, R. (2014). Importance of coordination motor abilities in expert-level on-sight sport climbing. *Medicina Sportiva*, 18(1), 16-23. <https://doi.org/10.5604/17342260.1094782>
- Stien, N., Saeterbakken, A. H., & Andersen, V. (2022). Tests and Procedures for Measuring Endurance, Strength, and Power in Climbing - A Mini-Review. *Frontiers in sports and active living*, 4, 847447. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.847447>
- Stien, N., Vereide, V. A., Saeterbakken, A. H., Hermans, E., Shaw, M. P., & Andersen, V. (2021). Upper body rate of force development and maximal strength discriminates performance levels in sport climbing. *PLoS one*, 16(3), e0249353.
- Sveen, J., Stone, K. J., & Fryer, S. (2016). Strength and forearm volume differences in boulderers and sport climbers. In: International Rock Climbing Research Association (Hrsg.) 3rd Rock climbing research congress, Proceedings 2016 (S. 10-11). https://www.ircra.rocks/_files/ugd/441095_76117ef587b34539bc29d428a39b366b.pdf
- Taylor, N., Giles, D., Panáčková, M., Mitchell, J., Chidley, J., & Draper, N. (2020). A Novel Tool for the Assessment of Sport Climbers' Movement Performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(6), 795-800.
- Tomaszewski, P., Gajewski, J., & Lewandowska, J. (2011). Somatic profile of competitive sport climbers. *Journal of Human Kinetics*, 29(2011), 107-113.
- Torr, O., Randall, T., Knowles, R., Giles, D., & Atkins, S. (2020). Reliability and Validity of a Method for the Assessment of Sport Rock Climbers' Isometric Finger Strength. *Journal of Strength and Conditioning*

- Research*, 36(8), 2277-2282.
<https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000003548>
- Vereide, V., Andersen, V., Hermans, E., Kalland, J., Saeterbakken, A. H., & Stien, N. (2022). Differences in Upper-Body Peak Force and Rate of Force Development in Male Intermediate, Advanced, and Elite Sport Climbers. *Frontiers in sports and active living*, 4, 888061.
- Vigouroux, L., & Quaine, F. (2006). Fingertip force and electromyography of finger flexor muscles during a prolonged intermittent exercise in elite climbers and sedentary individuals. *Journal of Sports Sciences*, 24(2), 181-186. <https://doi.org/10.1080/02640410500127785>
- Votava, J., Matej, Otaha, Otáhal, M., & Kutílek, P. (2018). Predictors of boulder climbing performance in youth boulder climbers. *ISBS Proceedings Archive*, 36(1), 662.
- Wall, C. B., Starek, J. E., Fleck, S. J., & Byrnes, W. C. (2004). Prediction of indoor climbing performance in women rock climbers. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 18(1), 77-83.
- Watts, P. B., Daggett, M., Gallagher, P., & Wilkins, B. (2000). Metabolic response during sport rock climbing and the effects of active versus passive recovery. *International Journal of Sports Medicine*, 21(3), 185-190. <https://doi.org/10.1055/s-2000-302>
- Watts, P. B., & Drobish, K. (1998). Physiological responses to simulated rock climbing at different angles. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(7), 1118-1122.
- Watts, P. B., & Jensen, R. L. (2003). Reliability of Peak Forces During a Finger Curl Motion Common in Rock Climbing. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 7(4), 263-267. https://doi.org/10.1207/s15327841mpee0704_4
- Watts, P. B., Jensen, R. L., Gannon, E., Kobeinia, R., Maynard, J., & Sansom, J. (2008). Forearm EMG during rock climbing differs from emg during handgrip dynamometry. *International Journal of Exercise Science*, 1, 4-13.
- Watts, P. B., Martin, D. T., & Durtschi, S. (1993). Anthropometric profiles of elite male and female competitive sport rock climbers. *Journal of Sports Sciences*, 11(2), 113-117. <https://doi.org/10.1080/02640419308729974>
- Watts, P.B., Newbury, V., & Sulentic, J. (1996). Acute changes in handgrip strength, endurance, and blood lactate with sustained sport rock climbing. *The Journal of Sports Medicine and physical fitness*, 36, 255-260.
- White, D. J., & Olsen, P. D. (2010). A Time Motion Analysis of Bouldering Style Competitive Rock Climbing. *Journal of Strength and Conditioning*

Research, 24(5), 1356-1360.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181cf75bd>

- Winkler, M. (2016). *Entwicklung und Validierung eines Messverfahrens zur Messung der sportartspezifischen Fingerausdauer im Wettkampfklettern der Disziplin Lead* [Unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Johann-Wolfgang Goethe Universität Frankfurt a.M.
- Zampagni, M. L., Brigadoi, S., Schena, F., Tosi, P., & Ivanenko, Y. (2011). Idiosyncratic control of the center of mass in expert climbers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(5), 688-699.
- Zarattini, J. A., Motta-Santos, D., Abreu, E. A., Costa, H. A., Carvalho, G. L., Mendes, T. T., & Scotti Rabelo, A. (2018). Lead climb induces higher heart rate responses compared to the top rope in intermediate and advanced climbers. *Journal of Exercise Physiology Online*, 21(1), 102-111.